

# **Validierung von satellitenbasierten Eisenbahnortungssystemen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von: Ján Poliak  
aus: Zvolen

eingereicht am: 14.08.2008  
mündliche Prüfung am: 17.03.2009

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Eckehard Schnieder  
Prof. Ing. Milan Dado PhD.

2009

# Kurzfassung

Satellitennavigation ist heutzutage für die Ortungssysteme im Straßen- und Schienenverkehr unumgänglich, trotzdem gibt es zurzeit nur wenige verbreitete Anwendungen. Die aktuellen Arbeiten von Forschungsinstitutionen, Komponentenherstellern, der Eisenbahnindustrie sowie nationalen und internationalen Behörden oder Einrichtungen die sich mit diesem Bereich beschäftigen, zeigen, dass hier ein großes Anwendungspotenzial besteht.

Die Eigenschaften und Merkmale dieser Satellitennavigationssysteme wie z.B. die Verfügbarkeit werden stark von den Umgebungsbedingungen beeinflusst, da diese Bedingungen die Stärke und die Ausbreitung der empfangenen Signale beeinträchtigen. Hierbei ist eine ausführliche Analyse der kritischen Szenarien, die diese Umgebungsbedingungen beschreiben, unentbehrlich, um so die Auswirkungen auf die Energie des empfangenen Signals in solchen Umgebungen besser zu verstehen. Auf diese Weise können ggf. die systemspezifischen Merkmale bei der Entwicklung und den Einsatz solcher Systeme berücksichtigt werden.

In dieser Arbeit werden die wichtigen Aspekte satellitenbasierter Ortungssysteme erläutert und einige relevante Merkmale sowie ein systematischer Einsatz hergeleitet, die charakteristischen Größen von GNSS mit Hilfe eines unabhängigen Referenzmesssystems zu ermitteln. Es werden die grundlegenden Einsatzmöglichkeiten von Referenzmesssystemen für satellitenbasierte Anwendungen im Eisenbahnbereich diskutiert und schließlich wird auch einer der ersten Ansätze skizziert und erläutert. Dazu wird auch das resultierende Referenzmesssystem vorgestellt und erläutert.

Mit diesen werden während einer Testfahrt Daten entsprechend einem Testszenario erhoben. Die Positionsungenauigkeit für statische und dynamische Messungen wird mittels des Referenzmesssystems („GaTRail“) verglichen und anschließend analysiert. So wird gezeigt, dass man während der dynamischen Messungen (bei Berücksichtigung minimaler Umgebungseigenschaften) einige wichtige Eigenschaften GNSS basierter Positionsbestimmung quantitativ und qualitativ betrachtet kann.

Schließlich wird das zugehörige Messmanagementsystem beschrieben und einige allgemeine sowie spezifische Anforderungen werden aufgelistet. Abschließend wird der gesamte Themenbereich in den Kontext Validierung von GNSS basierten Anwendungen eingeordnet, der Teil eines Zertifizierungsprozesses ist. Dieser wird zusammen mit einem erforderlichen dem Akkreditierungsprozess formal dargestellt und erläutert.

---

# Abstract

Nowadays, satellite navigation is widespread for positioning systems in road and railway traffic, yet there are presently few prevalent applications. Current workings of research institutions, manufacturers of components, railway industry as well as national and international authorities or institutions dealing with this domain show actually that a huge application potential does exist.

These satellite navigation systems' main parameters, e.g. their availability are strongly affected by environmental conditions, as these conditions have an effect on the received signals. Here it is indispensable to perform a thorough analysis of critical scenarios describing the environmental conditions, in order to obtain a better understanding of the impact on the performance of the received signal in these environments. In doing so, it is possible to take the characteristics specific for the system into consideration during development and use.

This work will illustrate the important aspects of satellite-based positioning systems and describe some of the relevant characteristics in detail. It discusses the basic possibilities of application of reference measuring systems for satellite-based applications in railway traffic and will finally give an outline of and explain one of the first approaches.

During a test drive, data are gathered according to a test scenario. The positioning inaccuracy of static and dynamic measurements will be compared using the reference measuring system "GaTRail", and analyzed subsequently. This will show that it is possible to consider numerous important features of GNSS-based location determination during dynamic measurements quantitatively and qualitatively (considering a minimal GNSS reception condition).

Finally, the measurement management system will be described, and some general as well as specific requirements will be listed. The entire work deals with the subject "Validation of GNSS-based applications" which is part of a certification process. The latter will be formally described and explained.

---

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.–Ing. Dr. h.c. Eckehard Schnieder, dem Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, für die menschliche und fachliche Unterstützung und Förderung. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter an seinem Institut hat er mir den Freiraum gegeben, diese Arbeit durchführen zu können. Unsere zahlreichen Gespräche, seine fachlichen Hinweise und Anregungen haben mir sehr geholfen.

Herrn Prof. Ing. Milan Dado PhD., dem Leiter des Lehrstuhl für Nachrichtentechnik, dem Dekan und ehemaligen Rektor der Universität in Zilina, danke ich für die Übernahme der Zweitgutachtertätigkeit, seine Anregungen, Hinweise und Gespräche.

Herrn Prof. Dr.–Ing. Karsten Lemmer, dem Leiter des Institutes für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig und Berlin, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kolleginnen und Kollegen sowie Studierenden, die durch das angenehme Arbeitsklima einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet haben. Dies gilt besonders für die Herren Jörg Müller, Frank Hänsel, Daniel Beisel, Jürgen Schröder, Yi Weng, Yong Zhou und Uwe Becker hinsichtlich der vielen Diskussionen sowie Korrektur des Manuskripts.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Petroslava und meinem Sohn Martin, die mich stets unterstützt und motiviert haben.

„This is not the end. It is not even the beginning of the end. But it is perhaps, the end of the beginning.” (Winston Churchill)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>ORTUNG IM VERKEHR .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>GNSS BASIERTE ORTUNG .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>ANSATZ ZUR VALIDATION VON GNSS BASIERTEN ANWENDUNGEN .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>VALIDIERUNGSWERKZEUGE FÜR GNSS BASIERTE ANWENDUNGEN ...</b>	<b>19</b>
1.4.1	Polaris .....	19
1.4.2	ERGOSPACE .....	20
1.4.3	GRANADA .....	20
1.4.4	GATE .....	20
1.4.5	RailDrive .....	20
1.4.6	GSSF .....	20
1.4.7	GARE .....	21
1.4.8	Klassifikation der Validierungswerkzeuge .....	21
<b>1.5</b>	<b>AUFBAU DER ARBEIT .....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>KLASSIFIZIERUNG UND EIGENSCHAFTEN VON SENSOREN UND MESSSYSTEMEN .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>EIGENSCHAFTEN VON OBJEKTEN .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>BESCHREIBUNGSMITTEL ZUR KLASSIFIKATION VON SENSOREN UND MESSVERFAHREN (UML) .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3</b>	<b>EIGENSCHAFTEN VON SENSOREN UND MESSSYSTEMEN .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4</b>	<b>KLASSIFIKATION VON SENSOREN .....</b>	<b>29</b>
2.4.1	Physikalische Ausprägung der Messgröße .....	30
2.4.2	Lokalisierung des Sensors bzw. Messsystems .....	31
2.4.3	Dynamisches Verhalten der Messgrößenerfassung .....	32
2.4.4	Energieeinsatz .....	32
2.4.5	Prinzipielle Auswertungsverfahren .....	33
<b>2.5</b>	<b>METROLOGISCHE BEGRIFFE UND DEFINITIONEN .....</b>	<b>33</b>
2.5.1	Messmanagementsystem .....	33
2.5.2	Messprozess .....	33
2.5.3	Messmittel .....	34
2.5.4	Metrologische Bestätigung .....	34
2.5.5	Qualifizierung .....	34
2.5.6	Validierung .....	34
2.5.7	Verifizierung .....	34
<b>2.6</b>	<b>AUSWERTUNGSVERFAHREN FÜR DIE WELLENAUSBREITUNGSSENSORIK .....</b>	<b>34</b>
2.6.1	Messung der Laufzeit .....	34
2.6.2	Messung der Phasenverschiebung .....	35

---

2.6.3	Messung der Frequenzverschiebung (Dopplereffekt).....	36
2.6.4	Korrelation .....	38
<b>2.7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>TERRESTRISCHE MESSSYSTEME UND SENSORIK ZUR ORTUNG IM EISENBAHNBereich .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>ELEKTROMAGNETISCHE UND AKUSTISCHE SENSOREN.....</b>	<b>40</b>
3.1.1	Akustische Sensoren (Ultraschall) .....	40
3.1.2	Radar.....	41
3.1.3	Lidar/Ladar .....	41
3.1.4	(Stereo-)Kamerasysteme.....	42
<b>3.2</b>	<b>FAHRZEUGSEITIGE SENSOREN .....</b>	<b>42</b>
3.2.1	Tachometer .....	42
3.2.2	Beschleunigungssensoren.....	43
3.2.3	Odometer .....	44
3.2.3.1	Radimpulsgeber.....	45
3.2.3.2	Wirbelstromsensor.....	45
3.2.4	Induktive Sensoren .....	46
3.2.5	Hallsensoren.....	46
3.2.6	Vergleich ausgewählter fahrzeugseitiger Sensoren .....	46
<b>3.3</b>	<b>INFRASTRUKTURSEITIGE SENSOREN .....</b>	<b>47</b>
3.3.1	Induktionsschleifen und Achszähler im Schienenverkehr.....	47
3.3.2	Achszähler.....	47
3.3.3	Gleisstromkreis.....	47
3.3.4	Lichtschranke .....	47
<b>3.4</b>	<b>KOMBINIERTER SENSORSYSTEME ZUR ORTUNG .....</b>	<b>48</b>
3.4.1	Punktförmige Zugbeeinflussungssysteme.....	48
3.4.1.1	Krokodil .....	48
3.4.1.2	Induktive Zugsicherung.....	48
3.4.2	Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) .....	49
3.4.3	Transponder basierte Systeme.....	49
3.4.3.1	RFID System .....	49
3.4.3.2	Eurobalise.....	50
<b>3.5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>SATELLITEN BASIERTE ORTUNGSSYSTEME ZUR POSITIONSBESTIMMUNG .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>POSITIONSBESTIMMUNG MIT SATELLITENSYSTEMEN .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS).....</b>	<b>55</b>
4.2.1	Segmente des GPS .....	55
4.2.1.1	Raumsegment .....	55
4.2.1.2	Kontrollsegment.....	56
4.2.1.3	Nutzersegment .....	57
4.2.2	Dienste von GPS .....	57
4.2.3	GPS Satellitensignale .....	58
<b>4.3</b>	<b>GLONASS .....</b>	<b>58</b>

4.3.1	GLONASS Systembeschreibung .....	59
4.3.2	Das GLONASS-Signal .....	59
<b>4.4</b>	<b>GALILEO .....</b>	<b>60</b>
4.4.1	Dienste von GALILEO .....	60
4.4.1.1	Offener Dienst (Open Service - OS) .....	61
4.4.1.2	Kommerzieller Dienst (Commercial Service, CS) .....	61
4.4.1.3	Sicherheitskritischer Dienst (Safety of Life Service, SoL) .....	61
4.4.1.4	Öffentlich regulierter Dienst (Public Regulated Service, PRS) .....	62
4.4.1.5	Such- und Rettungsdienst (Search and Rescue, SAR) .....	62
4.4.2	Signale und Frequenzen von GALILEO .....	62
4.4.2.1	Frequenzbänder von GALILEO .....	62
4.4.2.2	Signale von GALILEO .....	63
4.4.3	Systemarchitektur von GALILEO .....	65
4.4.3.1	Globale Komponente .....	65
4.4.3.2	Lokale Komponente .....	67
4.4.3.3	Regionale Komponente .....	67
4.4.3.4	Nutzersegment .....	67
4.4.3.5	Zeit- und Referenzsysteme von GALILEO .....	67
4.4.3.6	GALILEO Referenzsystem .....	68
4.4.3.7	GALILEO Zeitsystem .....	68
<b>4.5</b>	<b>VERGLEICH VON GALILEO UND GPS .....</b>	<b>68</b>
<b>4.6</b>	<b>GNSS AUGMENTATION SYSTEME .....</b>	<b>69</b>
4.6.1	ABAS: Aircraft-Based Augmentation System .....	69
4.6.2	GBAS: Ground-Based Augmentation System .....	70
4.6.3	GRAS: Ground-Based Regional Augmentation System .....	70
4.6.4	Satellite-Based Augmentation System .....	70
4.6.4.1	EGNOS .....	71
4.6.4.2	Wide Area Augmentation System .....	72
4.6.4.3	MTSAT Based Augmentation System .....	73
<b>4.7</b>	<b>STARTMODI EINES GNSS-EMPFÄNGERS UND IHRE UNTERSCHIEDLICHEN URSACHEN .....</b>	<b>73</b>
4.7.1	Factorystart .....	73
4.7.2	Warmstart und Hotstart .....	73
4.7.3	Kaltstart .....	73
<b>4.8</b>	<b>ANALYSE DER GNSS UMGEBUNGSBEDINGUNGEN .....</b>	<b>74</b>
4.8.1	Grundprinzipienbeschreibung von Wellenausbreitung in Bezug auf GNSS .....	74
4.8.1.1	Wellenausbreitungseigenschaften .....	74
4.8.1.2	Atmosphärische Effekte bei Satellitenmessungen .....	75
4.8.1.3	Mehrwegeausbreitungen bei Satellitenmessungen .....	76
4.8.2	Relevante Faktoren für die Verfügbarkeit des GNSS-Systems in einer Umgebung .....	76
4.8.3	Der atmosphärische Effekt .....	77
4.8.4	Fehlerquellen und ihr Einfluss auf die Positionsbestimmung .....	77
4.8.5	Geometrische Disposition des Satelliten .....	78
4.8.5.1	Anzahl der verfügbaren Satelliten über der Zeit .....	79
4.8.5.2	Einfluss der Anzahl der sichtbaren Satelliten auf die Genauigkeit bei der Positionsbestimmung .....	80
4.8.5.3	Einfluss der Abschattung .....	80
4.8.5.4	Mehrwegeausbreitung .....	81
4.8.6	Erfassung der GNSS-Umgebung .....	82

<b>4.9</b>	<b>VERFÜGBARKEIT UND GENAUIGKEIT DER GALILEO SOL DIENST</b>	<b>82</b>
4.9.1	Genauigkeit (engl.: Accuracy)	82
4.9.2	Integrität (engl.: Integrity)	83
4.9.3	Kontinuität (engl.: Continuity)	84
4.9.4	Verfügbarkeit (engl.: Availability)	84
4.9.5	Zuverlässigkeit (engl.: Reliability)	84
4.9.6	Alert Limit	85
4.9.7	Time-to-Alert	85
4.9.8	Integrity Risk	85
4.9.9	Zusammenhänge zwischen den GNSS-Leistungsparametern	85
<b>4.10</b>	<b>LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER SATELLITENORTUNG</b>	<b>87</b>
<b>4.11</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>88</b>
<b>5</b>	<b>GNSS BASIERTE FAHRZEUGAUTARKE ORTUNG IM SCHIENENVERKEHR</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>ÜBERBLICK ÜBER EUROPÄISCHE PROJEKTE</b>	<b>89</b>
<b>5.2</b>	<b>PROJEKT UND SYSTEM DEMOORT</b>	<b>89</b>
5.2.1	Projektidee	90
5.2.2	Systemkomponenten	90
<b>5.3</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>METHODISCHE HERLEITUNG DES VALIDIERUNGSKONZEPTE</b>	<b>94</b>
<b>6.1</b>	<b>AUFGABEN UND PROBLEME DER VALIDATION</b>	<b>94</b>
6.1.1	Korrespondenzfindung zwischen Koordinatensystemen	95
6.1.2	Zeitsynchronisation und Abtastrate	95
6.1.3	Auswertung der Messwerte in Bezug auf die Messunsicherheit	96
6.1.4	Schlussfolgerung	97
6.1.5	Generische Empfehlung für ein Validierungswerkzeug	98
<b>6.2</b>	<b>METHODISCHER ANSATZ ZUR ANFORDERUNGS- UND LÖSUNGSANALYSE FÜR EIN VALIDIERUNGSWERKZEUG</b>	<b>99</b>
6.2.1	Grundsätzliche Systemspezifikation	100
6.2.2	Ansatz für methodische Spezifikationserstellung – Requirements Engineering	100
6.2.3	Morphologischer Kasten	101
<b>6.3</b>	<b>LÖSUNGSANSÄTZE UND AUSWAHL DER SENSOREN FÜR DAS REFERENZMESSSYSTEM</b>	<b>102</b>
<b>6.4</b>	<b>REFERENZMESSSYSTEM</b>	<b>105</b>
<b>6.5</b>	<b>ANWENDUNGSBEREICHE</b>	<b>106</b>
6.5.1	Zusätzliches Überwachungssystem für den Zugleitbetrieb	106
6.5.2	Untersuchung des GNSS-Empfängers	106
<b>6.6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>106</b>
<b>7</b>	<b>REALISIERUNG DES VALIDIERUNGSKONZEPTE: GATRIL</b>	<b>108</b>
<b>7.1</b>	<b>MIKROWELLENSENSOR (DOPPLERRADAR)</b>	<b>109</b>
<b>7.2</b>	<b>PUNKTUELLE POSITIONSERFASSUNG MITTELS DES RFID SYSTEMS</b>	<b>110</b>



<b>7.3</b>	<b>DIGITALE KARTE .....</b>	<b>112</b>
7.3.1	Zweck der digitalen Karte .....	112
7.3.2	Anforderungen an die digitale Karte.....	112
7.3.3	Streckeneinteilung .....	112
7.3.4	Elektronische Streckenkarte im standardisierten XML-Format .....	116
<b>7.4</b>	<b>POSITIONSBESTIMMUNG IM REFERENZMESSSYSTEM .....</b>	<b>117</b>
<b>7.5</b>	<b>MESSGELÄNDE .....</b>	<b>119</b>
7.5.1	VBV Braunschweig .....	119
7.5.2	AVG Karlsruhe.....	120
7.5.3	Tatrabahn Poprad.....	120
<b>7.6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>120</b>
<b>8</b>	<b>MESSERGEBNISSE UND DEREN INTERPRETATION .....</b>	<b>121</b>
<b>8.1</b>	<b>TESTSZENARIEN .....</b>	<b>121</b>
8.1.1	Einflüsse der Umgebung auf die Testsszenariendefinition .....	122
8.1.2	Untersuchung am unbewegten Empfänger.....	122
8.1.3	Untersuchungen am bewegten Empfänger.....	122
<b>8.2</b>	<b>TESTFAHRT.....</b>	<b>123</b>
<b>8.3</b>	<b>SICHTBARE SATELLITEN WÄHREND DER TESTFAHRT.....</b>	<b>123</b>
<b>8.4</b>	<b>HDOP WERTE.....</b>	<b>124</b>
<b>8.5</b>	<b>POSITION IM RAUM WÄHREND DER TESTFAHRT .....</b>	<b>125</b>
<b>8.6</b>	<b>MESSUNSICHERHEIT DER POSITIONSBESTIMMUNG.....</b>	<b>125</b>
<b>8.7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>127</b>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>128</b>
<b>9.1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>128</b>
<b>9.2</b>	<b>ANFORDERUNGEN AN DAS MESSMANAGEMENTSYSTEM .....</b>	<b>130</b>
9.2.1	Allgemeine Anforderungen .....	130
9.2.2	Anforderungen an das Prüflabor .....	131
9.2.3	Akkreditierungsprozess.....	132
<b>10</b>	<b>GLOSSAR .....</b>	<b>134</b>
<b>11</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>137</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Prinzip der Ortungsfunktion in Form eines Klassendiagramms nach [Schnieder 2007].....	16
Abbildung 1-2 GNSS basierte Anwendungen in Eisenbahnbereich .....	18
Abbildung 1-3 Aufteilung der Merkmale unterschiedlicher Bereiche [Hänsel et al. 2006a] .....	19
Abbildung 1-4 Überblick und inhaltliche Gliederung dieser Arbeit .....	25
Abbildung 2-1 Klassendiagramm zu Eigenschaften von Objekten .....	27
Abbildung 2-2 Klassendiagramm Notation [Jeckle et al. 2004] .....	28
Abbildung 2-3 Allgemeine Grundstruktur eines Sensorsystems inklusive Auswertung [Poliak, Hänsel 2007] ....	29
Abbildung 2-4 Klassifikation von Sensoren [Poliak, Hänsel 2007].....	30
Abbildung 2-5 Zusammenhänge zwischen Messgröße, messtechnischen Begriffen und sensierter Größe nach [Schnieder 2007].....	30
Abbildung 2-6 Klassifikation nach physikalischer Ausprägung der Sensorgröße (1/2) [Poliak, Hänsel 2007].....	31
Abbildung 2-7 Klassifikation nach physikalischer Ausprägung der Sensorgröße (2/2) [Poliak, Hänsel 2007].....	31
Abbildung 2-8 Ortsverteilung der Sensoren in Form eines Klassendiagramms [Poliak, Hänsel 2007].....	32
Abbildung 2-9 Messprinzipien in Form eines Klassendiagramms [Poliak, Hänsel 2007] .....	32
Abbildung 2-10 Energieeinsatz zur Messung in Klassendiagrammdarstellungen [Poliak, Hänsel 2007].....	33
Abbildung 2-11 Prinzip der Messwertgewinnung in Form eines Klassendiagramms [Poliak, Hänsel 2007].....	33
Abbildung 2-12 Grundprinzip der Laufzeitmessung [Poliak, Hänsel 2007] .....	35
Abbildung 2-13 Distanzmessung durch Laufzeitmessung in kartesischen Koordinaten [Poliak, Hänsel 2007].....	35
Abbildung 2-14 Prinzip der Entfernungsmessung durch Phasenverschiebung nach [Lux 2006] .....	36
Abbildung 2-15 Prinzip des Dopplereffektes bei Fahrzeugsensoren [Poliak, Hänsel 2007].....	37
Abbildung 2-16 Radarsensor nach dem Dopplerprinzip – Frequenzverschiebung [Klinge 1998].....	38
Abbildung 2-17 Korrelierte Sensorsignale [Engelberg 2001; Geistler 2006] .....	38
Abbildung 2-18 Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) [Geistler 2006] .....	39
Abbildung 3-1 Mechanischer Tachometer [Blume, Wesner 2002].....	43
Abbildung 3-2 Beispiel für direkte und indirekte Odometer [Poliak, Hänsel 2007].....	44
Abbildung 3-3 Prinzip des Wirbelstromsensors [Engelberg 2001; Geistler 2006] .....	45
Abbildung 3-4 Leitungsführung bei LZB .....	49
Abbildung 3-5 Darstellung des RFID Systems [Poliak, Hänsel 2007] .....	50
Abbildung 3-6 Eurobalise –Typ 1 [Siemens 2005a].....	51
Abbildung 4-1 Signal-Laufzeiten von drei Satelliten zur Positionsbestimmung im Raum [Evers, Kasties 2005] .....	54
Abbildung 4-2 Prinzip der Abstandmessung mit PRN-Code nach [Klinge 1998] .....	54
Abbildung 4-3 GPS-Konstellation [Kowoma 2007] .....	56
Abbildung 4-4 Konstellation der GLONASS- Satelliten [Mansfeld 1998].....	59
Abbildung 4-5 Frequenzen von GALILEO [ESA 2006b] .....	63
Abbildung 4-6 GALILEO Systemarchitektur nach [Becker et al. 2008] .....	65
Abbildung 4-7 GALILEO Konstellation [ESA 2002b].....	66

---

Abbildung 4-8 Systemarchitektur GRAS Typ B [Airservices Australia 2007].....	70
Abbildung 4-9 EGNOS Systemarchitektur nach [ESA 2006a].....	72
Abbildung 4-11 Fehler verursacht durch die Geometrie des Systems [Kowoma 2007] .....	79
Abbildung 4-12 Histogrammische Darstellung der sichtbaren Satelliten für eine statische Messung .....	80
Abbildung 4-13 Variation des HDOP (blau) in Abhängigkeit der sichtbaren Satelliten (grün).....	81
Abbildung 4-14 Grundprinzip der Mehrwegeausbreitung (rote Linie), direkte Sicht (blaue und grüne Linie) .....	82
Abbildung 4-15 Bezug zwischen den Merkmalen in GALILEO SoL Dienst .....	86
Abbildung 4-16 Formale Darstellung der GNSS basierten Ortungsfunktion als Klassendiagramm.....	87
Abbildung 5-1 DemoOrt prinzipieller Aufbau [Poliak et al. 2006h].....	91
Abbildung 5-2 Wirbelstromsensor (Links), Schaltschrank (Mitte) und GNSS-Antenne (Rechts) am Fahrzeug der Tatabahn .....	92
Abbildung 5-3 Multisensorsystem zur fahrzeugautarken Ortung [Schnieder et al. 2006] .....	93
Abbildung 6-1 Generische Darstellung des Validierungs- und Qualifizierungsprozesses .....	95
Abbildung 6-2 Koordinatentransformation .....	95
Abbildung 6-3 Einfluss der Abtastfrequenz auf die Positionierung .....	96
Abbildung 6-4 Streuung und Versatz der Messwerte bei GNSS.....	96
Abbildung 6-5 Korrespondenzfindung zwischen Referenz- und GNSS-Positionierungen.....	97
Abbildung 6-6 Darstellung der Differenz als Maß für die Genauigkeit des GNSS in einer Ebene.....	98
Abbildung 6-7 Grundsätzlicher Aufbau eines Referenzmesssystems [Hänsel et al. 2007].....	98
Abbildung 6-8 Anforderungsanalyse mit der Software DOORS (Screenshot aus dem Projekt DemoOrt).....	100
Abbildung 6-9 Ablauf der Systemspezifikation .....	100
Abbildung 6-10 Kreativitätstechniken .....	102
Abbildung 6-11 Konzept des Referenzmesssystems zu Positionsbestimmung mittels Transponder, Mikrowellensensor und Streckenkarte .....	104
Abbildung 6-12 Systemstruktur der Referenzplattform für den Schienenverkehrsbereich [Poliak et al. 2006c].	105
Abbildung 6-13 Methodische Herleitung des Validierungskonzeptes .....	107
Abbildung 7-1 Formale Darstellung des grundsätzlichen Aufbaus eines Referenzmesssystems auf einem Messgelände.....	108
Abbildung 7-2 Dopplerradar DRS05 [Deuta 2005] .....	109
Abbildung 7-3 Einbauspezifikation von Dopplerradar DRS05 [Deuta 2005].....	110
Abbildung 7-4 RFID-Transponder (Links), RFID-Antenne (Mitte) und RFID-Transponder an der Strecke (Rechts).....	111
Abbildung 7-5 Teilstück der Strecke (topographische Sicht) .....	113
Abbildung 7-6 Klassendiagramm der Streckenstruktur .....	114
Abbildung 7-7 Fehlerursache für die Messunsicherheit in Längsrichtung.....	115
Abbildung 7-8 Fehlerursache für die Messunsicherheit in Querrichtung .....	115
Abbildung 7-9 Auszug von der XML-basierte elektronische Streckenkarte.....	117
Abbildung 7-10 Struktur der Sensordatenfusion.....	118
Abbildung 7-11 Kontrollzentrum für die Visualisierung des Referenzmessprozesses .....	119
Abbildung 8-1 Typische Umgebungsmerkmale der Teststrecke Tatabahn .....	121
Abbildung 8-2 Testfahrt am 6. Juni 2008 von Štrbské Pleso nach Poprad (blaue Linie) [VKU 2004].....	123

Abbildung 8-3 HDOP Werte und Anzahl der sichtbaren Satelliten .....	124
Abbildung 8-4 Verlauf der Teststrecke in dreidimensionalem Raum.....	125
Abbildung 8-5 Histogrammische Darstellung von Positionsabweichungen in der geographische Länge und Breite.....	126
Abbildung 8-6 Messunsicherheit der Positionsbestimmung für statische und dynamische Messung.....	126
Abbildung 8-7 Positionsungenauigkeit während der Testfahrt .....	127
Abbildung 9-1 Modell des Messmanagementsystems nach [DIN10012 2004] .....	130
Abbildung 9-2 Formale Darstellung des Zertifizierungsprozesses [Hänsel 2008].....	132
Abbildung 9-3 Formale Darstellung des Akkreditierungsprozesses eines Messlabors [Hänsel 2008] .....	133

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Vergleich zwischen Simulationswerkzeugen und realen Anlagen für Validationsaufgaben .....	22
Tabelle 1-2 Validierungswerkzeuge für die GNSS Applikationen (Stand 07/2008).....	23
Tabelle 3-1 Vergleich von ausgewählten fahrzeugsseitigen Sensoren (Stand 07/2008) .....	46
Tabelle 4-1 GALILEO Trägerfrequenzen und ihre Navigationsdienste .....	63
Tabelle 4-2 GALILEO Signalparameter [ESA 2002b] .....	64
Tabelle 4-3 Systemarchitektur von GALILEO und GPS .....	68
Tabelle 4-4 Übersicht über die verfügbaren Informationen im GNSS Empfänger für verschieden Startmodi .....	74
Tabelle 4-5 GALILEO- User Equivalent Range Error Budget (UERE) [Ruiz 2003] .....	78
Tabelle 4-6 Leistungsmerkmale des GALILEO SoL-Dienstes [ESA 2002b].....	86
Tabelle 5-1 DemoOrt Konsortium Überblick .....	90
Tabelle 6-1 Beispiel für Auswahl den Sensoren für das Validationswerkzeug.....	103
Tabelle 6-2 Ausschnitt der Anforderungsliste an das Referenzmesssystem für die GNSS basierte Anwendungen .....	104
Tabelle 7-1 Kontaktlängen in Abhängigkeit des Abstands von Antenne zum Datenträger .....	111
Tabelle 7-2 Kontaktzeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit .....	111
Tabelle 7-3 Abstand zwischen zwei Datenträgern in der Kurve .....	115
Tabelle 7-4 Abstand der Datenträger in Abhängigkeit des Radius der Kurve .....	116
Tabelle 7-5 Definition der Ausgangsschnittstelle des Referenzmesssystems nach [SUBSET 2002] .....	118
Tabelle 7-6 Messgelände im Vergleich.....	119
Tabelle 8-1 Proportionale Berechnung der sichtbaren Satelliten von allen Messungen .....	124
Tabelle 8-2 Absolute Positionsabweichung während der Testfahrt .....	126

# Abkürzungsverzeichnis

<b>AAIM</b>	Aircraft Autonomous Integrity Monitoring
<b>ABAS</b>	Aircraft-based Augmentation System
<b>AL</b>	Alert Limit
<b>ARNS</b>	Radionavigationsdienstleistungen
<b>AS</b>	Anti-Spoofing
<b>AVG</b>	Fahrzeug -und Infrastrukturbetreiber
<b>BOC</b>	Binary Offset Carrier
<b>BPSK</b>	Bi-Phase Shift Key
<b>BT</b>	Bombardier Transportation in Mannheim
<b>C/A</b>	Coarse of Acquisition
<b>CCD</b>	Charge-coupled Device
<b>CEP</b>	Circular Error Probable
<b>CITAC</b>	Co-Operation on International Traceability in Analytical Chemistry
<b>CS</b>	Commercial Service
<b>DGPS</b>	Differential GPS
<b>DLR</b>	Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt Braunschweig
<b>DoD</b>	Department of Defence
<b>DOP</b>	Dilution Of Precision
<b>DTD</b>	Document Type Definition
<b>EA</b>	European Co-operation for Accreditation
<b>EC</b>	European Commission
<b>EGNOS</b>	European Geostationary Navigation Overlay Service
<b>ERIS</b>	External Region Integrity System
<b>ESA</b>	European Space Agency
<b>eSISE</b>	estimated Signal In Space Error
<b>ETG</b>	Europäischen Tripartite Group
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EUROLAB</b>	European Federation of National Associations of Measurements, Testing and Analytical Laboratories
<b>FANS</b>	Future Air Navigation System
<b>FDE</b>	Fault Detection and Exclusion
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiplex Access
<b>FFFS</b>	Form, Fit, Functional Interface Specification
<b>GBAS</b>	Ground-based Augmentation System
<b>GCC</b>	GALILEO Control Centre
<b>GCS</b>	Ground Control Segment
<b>GDOP</b>	Geometric Dilution of Precision
<b>GIC</b>	GNSS Integrity Channel
<b>GJU</b>	GALILEO Joint Undertaking
<b>GLONASS</b>	Globalnaya Navigatsionnaya Spoutnikovaya Sistema
<b>GMS</b>	Ground Mission Segment
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GRAS</b>	Ground-based regional Augmentation System
<b>GSA</b>	European GNSS Supervisory Authority
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>GSS</b>	GALILEO Sensor Station
<b>GST</b>	GALILEO System Time
<b>GTRF</b>	GALILEO Terrestrial Reference Frame
<b>GUM</b>	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement
<b>HAL</b>	Horizontal Alert Limit
<b>HDOP</b>	Horizontal Dilution of Precision

---

<b>HPL</b>	Horizontal Protection Limits
<b>ICAO</b>	International Civil Navigation Organization
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>IF</b>	Integrity Flag
<b>IGEX</b>	International GLONASS Experiment
<b>IGS</b>	International GPS Service
<b>ILAC</b>	International Laboratory Accreditation Co-operation
<b>IMO</b>	International Maritime Organisation
<b>INRETS</b>	Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité
<b>INS</b>	Inertial Navigation System
<b>IR</b>	Integrity Risk
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>ITRF</b>	International Terrestrial Reference Frame
<b>ITRS</b>	International Terrestrial Reference System
<b>iva</b>	Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig
<b>KKF</b>	Kreuzkorrelationsfunktion
<b>LAAS</b>	Local Area Augmentation System
<b>LRR</b>	Long Range Radar
<b>LZB</b>	Linienzugbeeinflussung
<b>MCC</b>	Mission Control Centres
<b>MEO</b>	Medium Earth Orbit
<b>MRT</b>	Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Karlsruhe
<b>MSAS</b>	MTSAT Satellite-based Augmentation System
<b>MTSAT</b>	Multi-Functional Transport Satellite
<b>NAVSTAR</b>	Navigational Satellite Timing and Ranging
<b>NLES</b>	Navigation Land Earth Stations
<b>OCS</b>	Operational Control System
<b>OS</b>	Open Service
<b>PDOP</b>	Position Dilution of Precision
<b>PE</b>	Protection Error
<b>PL</b>	Protection Limits
<b>PPS</b>	Precise Positioning Service
<b>PREDISSAT</b>	PREDictive Software for Satellite Availability in the field of Transport
<b>PRN</b>	Pseudo Random Noise
<b>PRS</b>	Public Regulated Service
<b>QZSS</b>	Quasi-Zenith Satellite System
<b>RAIM</b>	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>R-GEO</b>	GEO Ranging
<b>RIMS</b>	Ranging and Integrity Monitoring Stations
<b>RNSS</b>	Radionavigation-Satellitendienste
<b>SA</b>	Selective Availability
<b>SAR</b>	Search and Rescue
<b>SAS</b>	Schweizerische Akkreditierungsstelle
<b>SBAS</b>	Satellite-based Augmentation System
<b>SEP</b>	Spherical Error Probable
<b>SISA</b>	Signal In Space Accuracy
<b>SISE</b>	Signal In Space Error
<b>SISMA</b>	Signal In Space Monitoring Accuracy
<b>SoL</b>	Safety of Life Service
<b>SPS</b>	Standard Positioning Service
<b>SRR</b>	Short Range Radar
<b>SRS</b>	System Requirements Specification
<b>SSRS</b>	Subsystem Requirements Specification
<b>TAI</b>	Temps Atomique International
<b>TDOP</b>	Time Dilution of Precision

<b>TH</b>	Integrity Flag Threshold
<b>TT&amp;C</b>	Telemetry Tracking & Command Station
<b>TTA</b>	Time-to-Alert
<b>TTF</b>	Time To First Fix
<b>UERE</b>	User Equivalent Range Error Budget
<b>UIC</b>	International Union of Railways
<b>ULS</b>	Uplink Stations
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>URS</b>	User Requirements Specification
<b>VAL</b>	Vertical Alert Limit
<b>VDB</b>	Very Data Broadcast
<b>VDOP</b>	Vertical Dilution of Precision
<b>VHF</b>	Very High Frequency
<b>VIM</b>	International Vocabulary of basic and general terms in Metrology
<b>VPL</b>	Vertical Protection Limits
<b>WAAS</b>	Wide Area Augmentation System
<b>WAD</b>	Wide Area Differential
<b>WGS-84</b>	World Geodetic System (1984)
<b>XML</b>	Extensive Markup Language

# 1 Einleitung

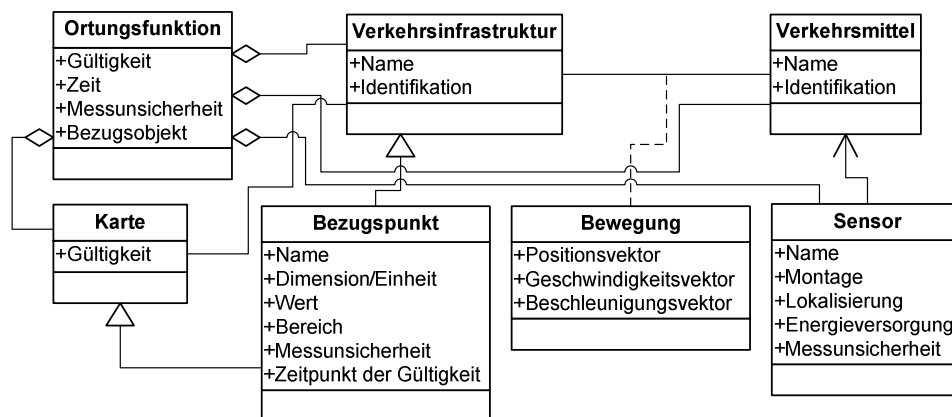
Das Ziel dieser Arbeit ist ein Konzept für ein Referenzmesssystem für die Validierung von GNSS basierten Anwendungen zu entwickeln und zu realisieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die wesentlichen Aspekte satellitenbasierter Ortungssysteme erläutert und einige wichtige Merkmale detailliert beschrieben. Wie sich aus dem Titel dieser Arbeit ergibt, werden hier die grundlegenden Einsatzmöglichkeiten von Referenzmesssystemen für die Validierung von satellitenbasierte Anwendungen im Eisenbahnbereich diskutiert und schließlich wird auch einer der ersten Ansätze beschrieben und erläutert.

## 1.1 Ortung im Verkehr

Der technische Prozess des Transportes von Personen und Gütern im spurgebundenen Verkehr kann als die Bewegung von Fahrzeugen auf Fahrwegen interpretiert werden. Die Steuerung, Sicherung und Überwachung dieser Fahrzeugbewegungen wird durch Betriebsleitsysteme durchgeführt [Klinge, Röver 1997].

Das Betriebsleitsystem benötigt jedoch neben dem aktuellen Status der streckenseitigen Einrichtungen, die einen Einfluss auf den Fahrtverlauf nehmen können, auch aktuelle präzise Informationen über die Dynamik der Fahrzeugbewegung, d.h. ihrer Position. Insbesondere die Ortungsinformationen werden innerhalb des Systems zur Lösung ihrer spezifischen Aufgaben benötigt [RailOrt 1998].

Den grundsätzlichen Aufbau einer Ortung zeigt das Klassendiagramm in Abbildung 1-1.



**Abbildung 1-1 Prinzip der Ortungsfunktion in Form eines Klassendiagramms nach [Schnieder 2007]**

Etymologisch betrachtet bedeutet der Begriff Ortung, die augenblickliche Position zu bestimmen [Drodowski 1977]. Der Begriff Position beschreibt den Standort eines beliebigen Objekts. Es handelt sich um ein bewegtes oder ortsfestes Objekt [Leinhos 1996].

Eine besonders wichtige Messgröße, für die oben genannten Angaben ist es zutreffend, dass der Bewegungszustand und die Identifikation der Verkehrsmittel in Bezug auf eine absolute Referenz im Raum zu beziehen ist. Die Erfassung dieser komplexen Messgröße wird als Ortung bezeichnet [Schnieder 2007].



## 1.2 GNSS basierte Ortung

Generell gibt es ungefähr ein Dutzend bekannte globale Navigationssatellitensysteme (GNSS). Hier zu erwähnen sind das europäische System GALILEO, das russische System GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Spoutnikovaya Sistema) und das amerikanische System GPS (Global Positioning System), und letzte Prognosen zeigen, dass im Jahr 2013 bis zu hundert funktionsfähige GNSS-Satelliten zur Verfügung stehen werden [Thomas et al. 2008].

Satellitenavigation ist heutzutage für Ortungssysteme im Straßen- und Schienenverkehr unumgänglich. Die aktuellen Arbeiten von Forschungsinstitution, Komponentenherstellern, Eisenbahnindustrie sowie nationalen und internationalen Behörden [UIC 2005b, UIC 2005a, UIC 2006] oder Einrichtungen, die sich mit dieser Problematik beschäftigen, zeigen, dass dieses Gebiet sehr vielversprechend ist [Barbu 2008b].

Außerdem basiert diese Arbeit auf den Ergebnissen und Erfahrungen von vielen internationalen Projekten wie z.B. APOLO [Alcouffe, Barbu 2001], LOCO, GIRASOLE [Girasole 2005], GADEROS [Urech et al. 2002], RUNE, ECORAIL, LOCOPROL und LOCASY [Thomas et al. 2008], sowie nationalen Projekten wie den deutschen Vorhaben SATNAB, DemoOrt (siehe Kapitel 5), GEMINI [Hänsel et al. 2007] und ZEUS [Hänsel et al. 2006c].

Die Haupteigenschaft wie z.B. die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit dieser Satellitenavigationssysteme sind stark von den Umgebungsbedingungen, z.B. der Abschattung durch Gebäude in der Nähe des GNSS-Empfängers beeinflusst, da diese Umgebungsbedingungen die Stärke und Ausbreitung des empfangenen Signals beeinträchtigen. Hierbei ist eine ausführliche Analyse der kritischen Szenarien, die diese Umgebungsbedingungen darstellen, unentbehrlich, um dadurch die Änderungen der Empfangsenergie des Signals in solchen Umgebungen besser zu verstehen und ggf. die systemspezifischen Merkmale (siehe Abschnitt 4.8) bei der Entwicklung und dem Einsatz solcher Systeme zu berücksichtigen [Dana 2007]. Neben den technischen Fragestellungen für den Validationsprozess sind zusätzliche eisenbahnspezifische Rechtsrahmen zu betrachten [Schnieder 2008].

In Abbildung 1-2 sind einige Anwendungen im Eisenbahnwesen, welche bereits auf GNSS basieren oder zukünftig basieren können, dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Anforderungen an die jeweiligen Anwendungen oder Dienste nicht gleich sind und stark von einsatzspezifischen Randbedingungen abhängen [Barbu 2008b; Stefano 2002]. Neben der Zuverlässigkeit der GNSS-Dienste sind die Genauigkeit und Verfügbarkeit die wichtigsten Eigenschaften, welche für jede Anwendung zu berücksichtigen sind [Shin et al. 2008; Baumann, Sichert 2007]. Die Passagierinformation ist schon in heutigen Zügen eine Standardanwendung, wobei hier GNSS keine Sicherheitsverantwortung übernehmen muss. Immer häufiger werden in Fachdiskussionen und Konferenzen [Zahradnik 2008] die GNSS basierten sicherheitsrelevanten Dienste sowie deren Randbedingungen diskutiert. Für ein solches Beispiel kann die Fahrzeugsicherung in Betracht gezogen werden. Ein ausführliches Beispiel wird in Kapitel 5 vorgestellt und dort werden die Grundprinzipien erläutert.

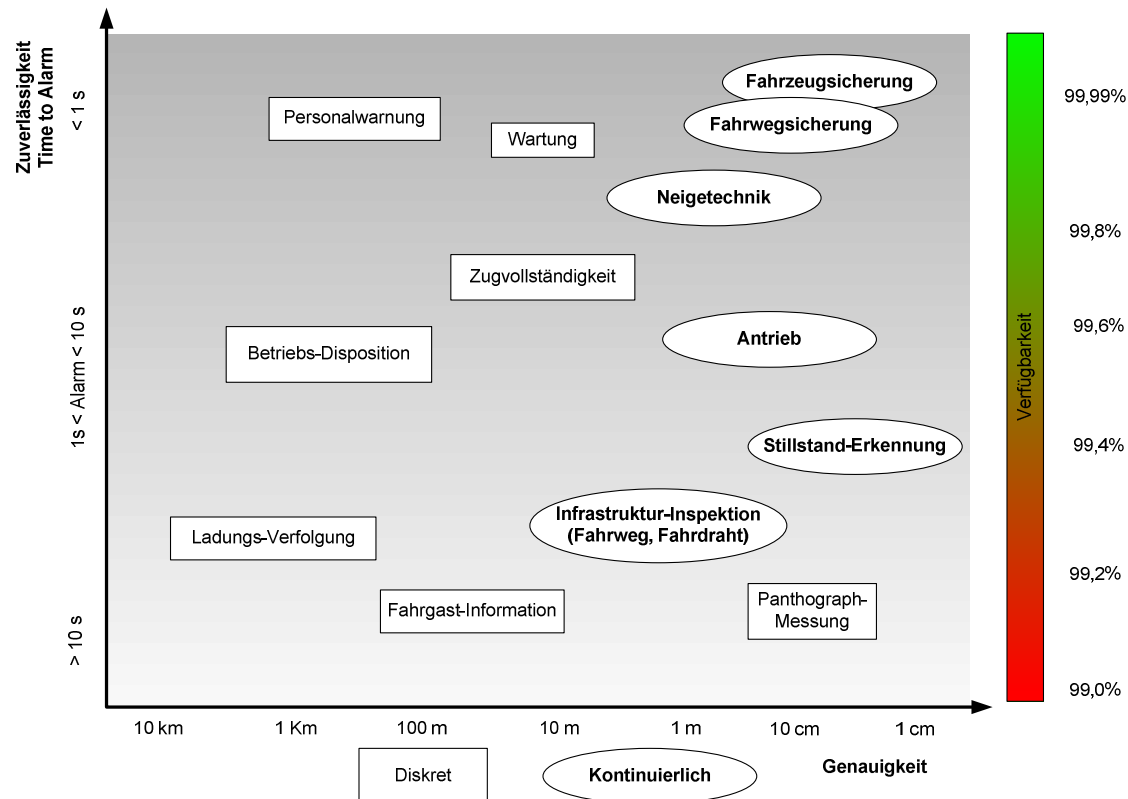


Abbildung 1-2 GNSS basierte Anwendungen in Eisenbahnbereich

### 1.3 Ansatz zur Validation von GNSS basierten Anwendungen

In der bodengebundenen Transportdomäne sind die Fahrzeuge oder [UIC 2005a, UIC 2006] fahrzeugbasierten Systeme zum großen Teil in Bewegung. Entweder bewegen sie sich in Relation zueinander, zur Infrastruktur oder zu einem anderen Bezugspunkt, z.B. der Erdoberfläche. Dieses muss auch bei der Validierung (siehe Abschnitt 6.1) der GNSS basierten Anwendungen berücksichtigt werden. Wichtig zu erwähnen ist, dass eine Validierung respektive ein Quantifizierungsprozess als ein Teilprozess des Zertifizierungsprozesses gesehen werden muss [Robert 2003].

Bisher wurden und zurzeit werden zahlreiche Ansätze zur Validierung (siehe Abschnitt 1.4) des GNSS entwickelt, ausprobiert und eingesetzt. Allerdings muss angemerkt werden, dass diese Validierungsmethoden ausschließlich stationäre Messungen nutzen. Die Großen dynamischer Merkmale wurden bisher nur empirisch abgeschätzt und keine grundlegenden Validations- und Verifikationsverfahren verwendet [Filip et al. 2008], was in sehr vielen Fällen, wenn man über nicht sicherheitsrelevante Anwendungen spricht, eine ausreichende Vorgehensweise ist. Die GNSS basierten Anwendungspotenziale wurden in den letzten Jahren immer häufiger mit Sicherheitsverantwortung in Einklang gebracht [UIC 2005b], woraus weitere Fragen bezüglich Zertifizierung, Rechtsrahmen und Leistungsgarantie resultieren [Barbu 2008b; Schlingelhof 2005].

Allgemein kann man feststellen, dass viele Merkmale einer Ortungsfunktion trotz verschiedener Transportdomänen identisch sind, was im speziellen Fall GNSS basierter Anwendungen

noch prägnanter zum Ausdruck gebracht werden kann. Nur ein relativ kleiner Teil der Anforderungen und Merkmale in der jeweiligen Transport-Domäne ist spezifisch, wobei es hier keine wesentliche Rolle spielt, ob die artifizielle oder natürliche Infrastruktur genutzt wird. Diese Synergie kann man auch in der qualitativen sowie quantitativen Betrachtung für die Zertifizierung solcher GNSS basierten Anwendungen nutzen (siehe Abbildung 1-3) [Hänsel et al. 2006c].

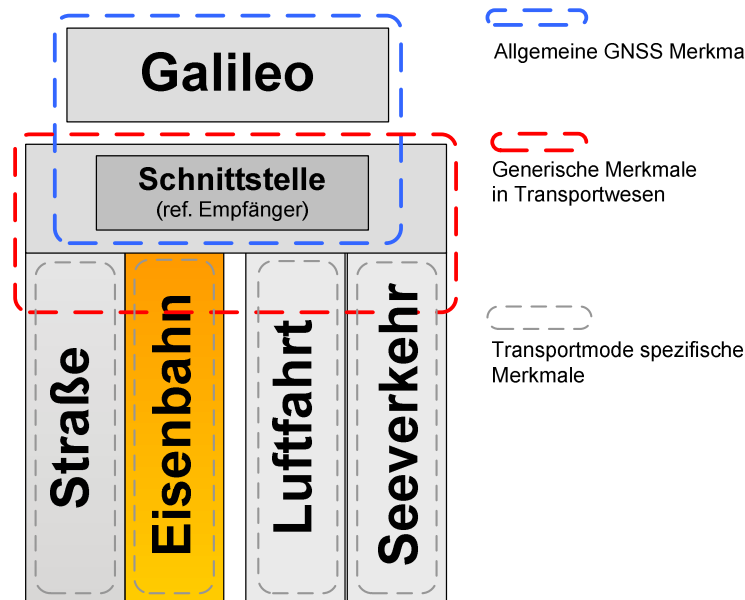


Abbildung 1-3 Aufteilung der Merkmale unterschiedlicher Bereiche [Hänsel et al. 2006a]

## 1.4 Validierungswerkzeuge für GNSS basierte Anwendungen

In den folgenden Abschnitten wurden bereits vorhandene und geplante Validierungswerkzeuge beschrieben, diskutiert und schließlich bewertet. Grundsätzlich kann man die Systeme in zwei Gruppen unterteilen, die Simulationswerkzeuge und die realen Anlagen, welche den Stand der Technik darstellen [Pfister et al. 2006].

Beide werden mit ihren spezifischen Eigenschaften, und ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. Diese Stärken und Schwächen werden dann in Bezug auf einen Validierungsprozess für ein GNSS ausgewertet.

### 1.4.1 Polaris

Polaris ist ein Simulationswerkzeug für die Untersuchung von Anwendungen in verschiedenen Nutzerumgebungen. Der Nutzer kann anwendungsspezifischen Eigenschaften in einer virtuellen Umgebung untersuchen und diese Erkenntnisse bei der Entwicklung weiterer Produkte und Dienste verwenden. Polaris unterstützt den Straßenbereich, den Eisenbahnbereich und die Schifffahrt [Garvin et al. 2006].

## **1.4.2 ERGOSPACE**

Die Software ERGOSPACE simuliert die Ausbreitung von GNSS Signalen und deren Konstellation in 3D-Umgebungen. Die deterministische Methode des Raytracings bestimmt die möglichen Wege der empfangenen Signale und beinhaltet mehrere Signalausbreitungsmodelle, die unterschiedlichen Umgebungstypen entsprechen. Diese Modelle charakterisieren und beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den Signalen und der gewählten Umgebung. Das Verhalten des beweglichen oder stationären Empfängers und seine Leistungen können in den Berechnungen berücksichtigt werden. Diese Software unterstützt die Systeme GLONASS, GALILEO, GPS und EGNOS [Tirtaine, Marais 2005].

## **1.4.3 GRANADA**

Der GALILEO Receiver ANALysis and Design Application (GRANADA) ist ein frei verfügbares Simulationswerkzeug, das sehr präzise einen echten GNSS-Empfänger ersetzen kann [Hu, Lohan 2007]. Das Simulationswerkzeug ist modular konfigurierbar und eignet sich für Lehre, Forschung und zu Validationszwecken [Hu, Lohan 2007; Hurskainen et al.].

## **1.4.4 GATE**

Die GALILEO Testumgebung GATE wird derzeit im Auftrag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) aufgebaut. Es dient dazu, die speziellen Fragestellungen von Empfänger- und Anwendungsentwicklern bei der Entwicklung ihrer Produkte für GALILEO zu unterstützen. Es sind grundsätzlich mehrere Testmodi in verschiedenen Testszenarien zu wählen, so dass die optimale Validationsumgebung garantiert werden kann [Wolf et al. 2003; Heinrichs et al. 2005; Pfister et al. 2006].

GATE besteht aus sechs Pseudosatelliten, die das GALILEO-Signal im Testgebiet im Großraum Berchtesgaden emulieren.

## **1.4.5 RailDrive**

RailDriVE® ist die Bezeichnung für ein Zweiwegefahrzeug, das mit verschiedenen Ortungs- und Kommunikationskomponenten ausgerüstet ist und im DLR Braunschweig entwickelt wurde. Es stellt ein Konzept zur Untersuchung verschiedener Straßen- und Eisenbahnpositionermittlungskomponenten an ihre einsatzspezifischen Merkmale dar. RailDriVE eignet sich für ein großes Nutzungsspektrum (Validierung von neuartigen Sensoren und Sensorsystemen, Erstellung elektronischer Streckenkarten usw.) [Gerlach et al. 2007].

## **1.4.6 GSSF**

Im Auftrag der ESA wurde ein GALILEO-Systemsimulator, die GALILEO System Simulation Facility (GSSF), von einem internationalen Konsortium unter der Führung von VEGA (Internationales Beratungs- und Technologieunternehmen) realisiert. Die GSSF dient besonders zur Bereitstellung von Funktionen, die zur Analyse und Bewertung des GALILEO-Systems hinsichtlich seiner Verfügbarkeit, Genauigkeit und Systemintegrität nötig sind. Das Zusatzmodul POSAT von GSSF soll es ermöglichen, verschiedene Algorithmen zur Positionsbestimmung (im Fahrzeug) zu evaluieren. Weiter führende Informationen zu diesem

Thema finden sich in der Arbeit von [Pfister et al. 2006].

### 1.4.7 GARE

Das interne Projekt GARE wurde im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit im UIC GALILEO Experts Panel konzipiert. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um die Kombination von Forschungsschwerpunkten des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (iVA) [Hänsel et al. 2007; Marais et al. 2007a; Hänsel et al. 2005] und der französischen Forschungseinrichtung INRETS LEOST aus Lille [Marais 2002; Marais et al. 2007b, Poliak et al. 2007b].

Die jeweils entwickelten Validierungswerkzeuge GaTRail<sup>1</sup> (siehe Kapitel 7) und PREDISAT (PREDIctive Software for Satellite Availability in the field of Transport) werden für einen gemeinsamen Ansatz im Validierungsprozess eingesetzt [Marais 2002; Marais et al. 2003; Marais et al. 2007b]. Das PREDISSAT-Werkzeug erlaubt es, die Anzahl der erreichbaren und zur Verfügung stehenden Satelliten für eine Positionsbestimmung zu jeder Zeit entlang einer festgelegten Trajektorie zu berechnen und vorherzusagen [Marais et al. 2007a].

### 1.4.8 Klassifikation der Validierungswerkzeuge

Wie klassifiziert man ein Validierungswerkzeug für eine Eisenbahnumgebung? Diese Frage wird immer häufiger gestellt, insbesondere in dem Moment, wenn man vor einer konkreten Zertifizierungs- oder Validierungsaufgabe steht. Die Entscheidung, anhand welcher Parameter man die Auswahl durchführen sollte, ist nicht leicht. Es gibt keinen generischen Ansatz, der die einfache Anwendung eines bestimmten Kriteriums oder eines Satzes von Kriterien ermöglicht.

Hier gilt allgemein, dass man zuerst analysieren sollte, welches Merkmal zu validieren ist und welche Größe die Validierungsgüte hat [Bachmair 2004]. Es bietet sich hier ein Ansatz an, das Merkmal und die Größe in verschiedenen Eigenschaften zu definieren [DAR 2002].

Hier ist schon die Analyse von vorhandenen Beiträgen zu diesem Thema sehr hilfreich. Unter anderem ist zu nennen die “GNSS Rail User Forum” group, “Requirements of rail applications” [Barbu 2000]. Weitere Werke, welche die Spezifika der Eisenbahnumgebung erklären und darstellen, sind in Betracht zu ziehen [ESA 2007; Alcouffe, Barbu 2001; Eissfeller 1997; Galileo Industries 2005; Leinhos 1996].

In diesem Abschnitt wird ein kurzer Vergleich obiger Validierungswerkzeuge aufgestellt. Allgemein kann man sagen, dass diese Werkzeuge in zwei Gruppen zu unterteilen sind (siehe Tabelle 1-1).

In die erste Gruppe gehören die Simulatoren, welche es ermöglichen, die typischen Eigenschaften von GNSS-Systemen zu simulieren und zu validieren. Hier ist ein großer Vorteil, dass man die Validierungsumgebung frei definieren oder wählen kann, was wiederum die Validation in konkreten bzw. speziellen Situationen ermöglicht, welche im realen Umfeld sehr schlecht oder kaum nachzubilden sind. Hierzu gehören z.B.

---

<sup>1</sup> Eigetragene Wertmarke

- spezielle Definition der Verbreitung von Signalen,
- vordefinierte Ortungsfehler,
- Verfügbarkeit von Satellitensignalen und
- bestimmte GNSS Dienste.

Der Nachteil oder die Schwäche von Simulationswerkzeugen ist, dass sie für ihre Simulation eine nahezu realistische Nachbildung in dreidimensionaler Form der Umgebung brauchen (siehe Tabelle 1-2), was wiederum einen sehr großen Aufwand und insbesondere Kosten verursachen kann. Dann sind aber die Ergebnisse sehr realitätsnah. Neben den industriellen Partnern werden diese sehr stark von der Europäischen Kommission bevorzugt (siehe Abschnitt 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3 und 1.4.6).

**Tabelle 1-1 Vergleich zwischen Simulationswerkzeugen und realen Anlagen für Validationsaufgaben**

Merkmal	Validation mit Softwarewerkzeug		Validation mit realer Anlage	
	Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
<b>TTFF-Kaltstart</b>	reproduzierbar			nicht reproduzierbar
<b>TTFF-Warmstart</b>	reproduzierbar			nicht reproduzierbar
<b>TTFF-Hotstart</b>	reproduzierbar			nicht reproduzierbar
<b>Positionsgenauigkeit in statischen Umgebungen</b>	reproduzierbar, definierbare Messunsicherheit	theoretische Umgebungsbedingungen	reale Umgebungsbedingungen	nicht reproduzierbar, nicht definierbare Messunsicherheit
<b>Positionsgenauigkeit in dynamischen Umgebungen</b>	reproduzierbar, definierbare Messunsicherheit	theoretische Umgebungsbedingungen	reale Umgebungsbedingungen	nicht reproduzierbar, nicht definierbare Messunsicherheit

In die zweite Gruppe von Validierungswerkzeugen kann man alle realen Anlagen einordnen (siehe Abschnitt 1.4.4, 1.4.5, 1.4.7 und Tabelle 1-2). Hierbei unterscheidet man, ob es sich um infrastruktursseitige, fahrzeugseitige oder kombinierte Werkzeuge handelt. Die Analyse und eigene Ergebnisse aus diesem Forschungsbereich haben schon gezeigt und nachgewiesen, dass mit solchen Systemen der Validierungsprozess in realer Umgebung durchgeführt werden kann. Die Ergebnisse sind für die weitere Entwicklung und den Zertifizierungsprozess ohne große Nacharbeitung belastbar [Bikker et al. 1999].

Hier muss man aber betonen, dass nicht alle realen Situationen leicht nachzubilden sind, und man kann oftmals nicht von genauen Wiederholungsbedingungen mit gleichen Umgebungsbedingungen sprechen.

**Tabelle 1-2 Validierungswerkzeuge für die GNSS Applikationen (Stand 07/2008)**

Werkzeuge	Werkzeugart	Vorteile	Nachteile	Eignung für Eisenbahnanwendung
<b>ERGOSPACE</b>	Simulationswerkzeug	Berücksichtigung von Umgebungseigenschaften, Simulation der Positionsfehler, Deterministisches Werkzeug	3D Umgebungsmodell erforderlich	Nur mit spezifischen Eisenbahnumgebungsmodell
<b>GRANADA</b>	Simulationswerkzeug	Validierter Empfängersimulator, Ausbreitungsfehler	Keine Ausbreitungshindernisse	Kein Eisenbahnumgebungsmodell
<b>Polaris</b>	Simulationswerkzeug	X-Genauigkeit, X-DOP, Verfügbarkeit für nutzerspezifische Dienste, statische Werkzeuge	Kein spezifisches Eisenbahnmodell	Falls Eisenbahnumgebungsmodell verfügbar
<b>GATE</b>	Reale Anlage (Infrastruktur)	Reale GALILEO Umgebung	Statische Pseudoliten, Keine Positionsreferenz	Nicht für Eisenbahngeplant
<b>RailDrIVE</b>	Reale Anlage (Fahrzeug)	Zweiwegefahrzeug einfache Handhabung	Keine vordefinierte Ausbreitungscharakteristik	Geeignet für Eisenbahnanwendungen, keine Umgebungskenntnisse vorhanden
<b>GARE</b>	Reale Anlage (Infrastruktur und Fahrzeug)	Positionsreferenz, Signalausbreitungsanalyse	Noch nicht implementiert	Geeignet für eisenbahnspezifische Anwendungen

## 1.5 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in neun inhaltliche Kapitel und stellt ein Konzept für ein Referenzmesssystem für die Validierung von GNSS basierten Anwendungen dar.

Neben dem Ausblick auf satellitenbasierten Anwendungen im Eisenbahnbereich listet das erste Kapitel auch die Validationswerkzeuge auf, welche heutzutage für den Einsatz im Eisenbahnbereich betrachtet werden können. Viele internationale und nationale Projekte sowie Entwicklungsarbeiten wurden betrachtet und anhand bestimmter Validationsanforderungen qualitativ bewertet. Ein generisches Validationskonzept wird vorgeschlagen, welches sowohl reale als auch simulative Untersuchungen vorsieht, um die jeweiligen Nachteile zu kompensieren. Der Ansatz sieht eine Referenzmessplattform als Quelle für die Referenzposition bei den Realversuchen vor. Um die Ergebnisse des Validationsprozesses vergleichbar zu machen, ist eine Gewährleistung von minimalen Umgebungsbedingungen notwendig. Der Ansatz wird in den Kapiteln 6 und 7 weiter entwickelt und beschreiben.

Das zweite Kapitel befasst sich mit allgemeinen Eigenschaften von Sensoren und Messsystemen. Das Begriffskonzept, welches durchgängig in der Arbeit angewendet wird, wird eingeführt und erläutert. Die grundlegende Klassifizierung von Sensoren wird mit formalen Beschreibungsmitteln dargestellt und einige grundlegende metrologische Begriffe und Definitionen, welche ihre Anwendung in der Arbeit gefunden haben, sind hier aufgelistet.

Das dritte Kapitel bietet einen Überblick über Messverfahren und Messsensoren, welche für Ortungssysteme im Eisenbahnbereich sowie von zukünftigen Referenzmesssystemen eingesetzt werden können. Einige grundlegende Messprinzipien werden kurz beschrieben und erläutert, welche wiederum bei der Auswahl der passenden Sensoren berücksichtigt werden (siehe Kapitel 6 und 7).

Das vierte Kapitel befasst sich mit den wichtigsten Eigenschaften und Merkmalen von GNSS.

Die Genauigkeit, Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit der Dienste eines GNSS ist entscheidend für die Nutzung im Verkehrsbereich. Die Konsequenzen mangelnder Zuverlässigkeit des Systems können dramatisch sein. Im Hinblick auf die Positionsbestimmung bei GNSS werden die Einflüsse dargestellt und erläutert, die eine genaue Positionsbestimmung beeinflussen. Zu den wichtigsten Faktoren zählen die Umgebungsbedingungen, welche ebenfalls kurz erläutert werden. Genauso werden die GNSS Systeme und deren Unterschiede sowie Gemeinsamkeiten betrachtet.

Das fünfte Kapitel beschreibt als Beispiel ein GNSS-basiertes Eisenbahnortungssystem das im BMWi-Projekt DemoOrt entwickelte System. Neben der grundsätzlichen Motivation und der zentralen Umsetzungsideen werden für ein GNSS basiertes Ortungssystem für sicherheitsrelevante Anwendungen im Eisenbahnbereich auch die Systemstruktur und Sensorkomponenten erklärt. Daneben wird der Vorteil einer kontinuierlichen Positionsübertragung von ermittelten Positionsdaten erläutert.

Das DemoOrt System wird als Applikationsbeispiel für das Validationsverfahren dienen, welches dann ausführlich in den Kapiteln 7 und 8 betrachtet wird.

Im sechsten Kapitel wird ein Requirements Engineering sowie eine Anforderungs- und Lösungsanalyse für ein unabhängiges Referenzmesssystem erklärt. Die vordefinierten Anforderungen werden mittels Kreativitätstechniken analysiert und es wird eine Auswahl getroffen.

Im siebten Kapitel wird das gemäß den Anforderungen konzipierte Referenzmesssystem GaTRail ausführlich vorgestellt und sein Aufbau sowie die angewendeten Sensoren und deren Messprinzipien und Eigenschaften erläutert. Das Gesamtkonzept sowie die Erfahrungsergebnisse werden illustriert. Die Einsatzgebiete und Teststrecken werden kurz dargestellt.

Im achten Kapitel werden die gemessenen Daten eines ausgewählten Testszenarios während einer Testfahrt auf einige bedeutende Eigenschaften und Merkmale analysiert. Die Positionsungenauigkeit des GNSS Empfängers wird mittels des Referenzmesssystems für statische und dynamische Messung verglichen und anschließend analysiert. Es wird so gezeigt, dass während der dynamischen Messungen (bei Berücksichtigung minimaler Umgebungseigenschaften) einige relevante Eigenschaften GNSS basierter Positionsbestimmung quantitativ und qualitativ schlechter geworden sind.

Schließlich wird die Arbeit zusammengefasst und das Messmanagementsystem beschrieben und einige spezifische sowie allgemeine Anforderungen aufgelistet. Das sich die gesamte Arbeit mit dem Themenbereich Validierung von GNSS basierten Anwendungen befasst, was ein Teil eines Zertifizierungsprozesses ist, wird dieser zusammen mit dem Akkreditierungsprozess formal dargestellt und kurz erläutert.

Die Gliederung dieser Arbeit zeigt Abbildung 1-4 in grafischer Form.



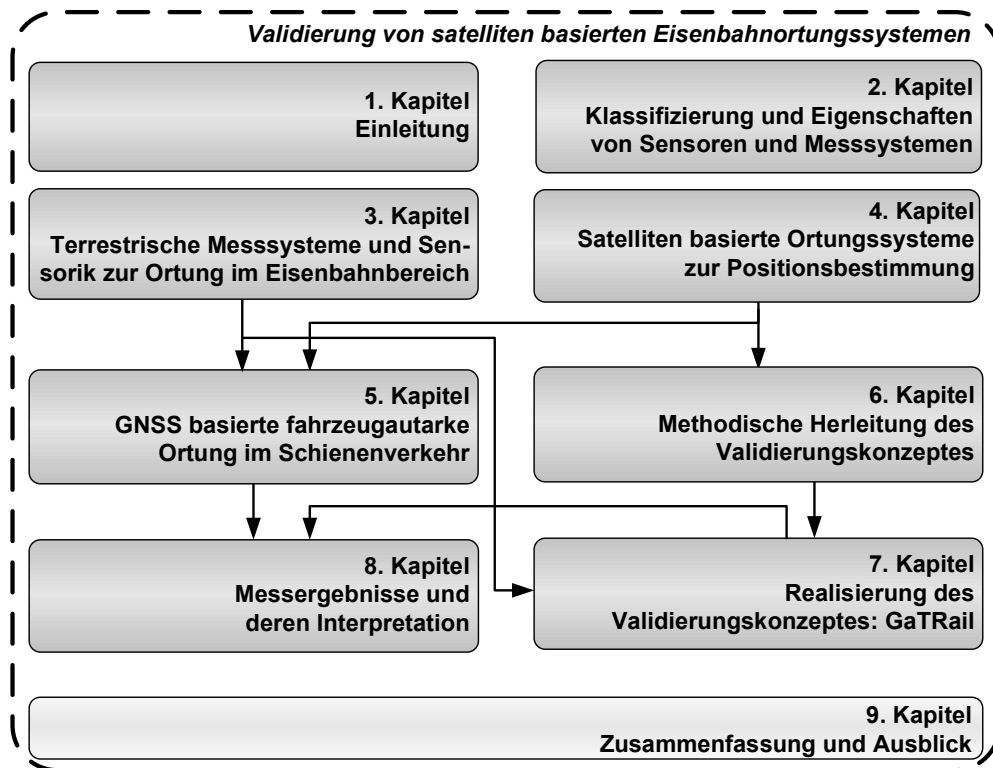


Abbildung 1-4 Überblick und inhaltliche Gliederung dieser Arbeit

# 2 Klassifizierung und Eigenschaften von Sensoren und Messsystemen

Die Grundlage für den Aufbau von Leitsystemen mit hoher Effizienz bildet das Wissen um den aktuellen Zustand, in dem sich das zu beeinflussende System befindet. Hierzu müssen in geeigneter Weise Informationen beschafft und ggf. zu einer verarbeitenden Stelle übertragen werden [Schnieder 1993].

## 2.1 *Eigenschaften von Objekten*

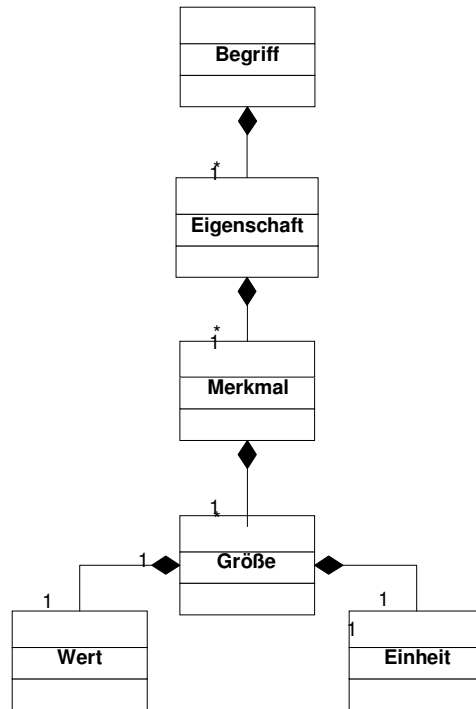
Um die Klarheit eines Vorgehens sicher zu stellen, ist es notwendig, dass alle Beteiligten über dasselbe Verständnis des Gegenstandsbereichs verfügen. Hierzu gehört insbesondere ein einheitliches Verständnis von Begriffen und den dazugehörigen Benennungen und verwendeten Wörtern. Dies trifft umso mehr zu, wenn bei dem Vorgehen oder Vorhaben verschiedene Domänen mit ihren eigenen (verschiedenen) Fachsprachen oder auch Partner aus verschiedenen Ländern und damit mit verschiedenen Landessprachen beteiligt werden sollen. Hierbei ist die Gefahr der Missverständnisse umso größer [Ortner 1997]. Als ein potentiell gefährliches Beispiel für solche gefährliche Situation kann das GNSS dienen. Hier treffen sich die alle vier Transportdomänen in einem System.

Nur wenn bereits auf dieser recht elementar erscheinenden Ebene der Begriffe und Benennungen Klarheit herrscht, können die weitergehenden Schritte des Vorgehens oder Vorhabens erfolgreich absolviert werden [Hänsel 2008].

Objekte oder Gegenstände - allgemein auch Begriffe - werden durch allgemeine Attribute, d. h. z.B. Eigenschaften und Merkmale, charakterisiert und grenzen sich durch diese voneinander ab (siehe Abbildung 2-1). Wenn quantitative Aussagen über Eigenschaften getroffen werden sollen, müssen diese in einer Größe ausgedrückt und skaliert werden können, für die wiederum ein Wert (als Ausprägung der Größe) sowie ggf. eine (physikalische) Einheit angegeben wird. Hierbei stellt eine Größe eine spezielle Form der Merkmalsausprägung dar [Schnieder 1993].

Soll eine Eigenschaft genauer (beispielsweise beschreibend) spezifiziert werden, so ist dafür eine weitere Verfeinerung notwendig, diese nimmt die Rolle eines konkreten Merkmals gegenüber der abstrakten Eigenschaft ein. Diese Hierarchisierung aus Begriff, Eigenschaft, Merkmal, Größe, Wert und Einheit stellt die Tiefe des Begriffs dar [Becker et al. 2008].

In Abbildung 2-1 ist dieser Zusammenhang angelehnt an ein Klassendiagramm dargestellt [Schnieder 2007; Schnieder, Schnieder 2008].



**Abbildung 2-1 Klassendiagramm zu Eigenschaften von Objekten**

Spezielle Eigenschaften satellitenbasierter Ortungssysteme werden in Abschnitt 4.9 detaillierter betrachtet.

## **2.2 Beschreibungsmittel zur Klassifikation von Sensoren und Messverfahren (UML)**

Für die Darstellungen von Sachverhalten nach dem Paradigma der Objektorientierung wurden die ursprünglichen, vielfältigen Diagrammart in der Unified Modeling Language (UML) konsolidiert [Schnieder 2007; Jeckle et al. 2004]. Rückhalt findet die Objektorientierung, da entsprechende Modellierungs- und Programmiersprachen, also Realisierungsmittel, diesen Rahmen unterstützen. So existieren mit der UML weit verbreitete Diagrammart, z.B. Klassendiagrammtypen Anwendungsfalldiagramme (Use Cases), Sequenzdiagramme (Message Sequence Charts), Aktivitätsdiagramme usw. [Born et al. 2003; Fowler, Scott 2000].

Wesentliche Begriffe des objektorientierten Paradigmas sind im Folgenden zusammengefasst. Eine detaillierte Einführung kann [Born et al. 2003; Jeckle et al. 2004] oder [Fowler, Scott 2000] entnommen werden.

- Objekte als konkrete oder abstrakte Bestandteile eines Systems, die als solche zu identifizieren sind, werden durch eine Menge von Attributen, d. h. Eigenschaften mit entsprechender Wertbelegung, beschrieben.
- Klassen (Typen) erfassen das Wesen einer Klasse von Objekten, während unter einer Instanz ein konkretes Objekt mit definierten Werten verstanden wird.

- Eine Instanz stellt die Ausprägung oder Zugehörigkeit eines Objektes innerhalb einer Klasse dar, sofern das Objekt die durch die Klasse formulierten strukturellen Gegebenheiten (Attribute und Beziehungen) einhält.
- Vererbung ist ein Mechanismus, der einem Objekt erlaubt, einen Teil der Definition eines anderen Objekts als Teil seiner eigenen Definition zu übernehmen.
- Abstraktion ermöglicht die Abbildung eines komplexen realen Zusammenhangs in einer vereinfachten bzw. auf das Wesentliche beschränkten Form.

Insbesondere der Aufbau von Partonomen durch die Ganzes-Relation („ist-Teil-von-Relation“) sowie die Gattungsrelation („ist-ein-Relation“) kann durch Assoziationen und Vererbungen in Klassendiagrammen dargestellt werden. Die Klassen werden sowohl in ihren statischen Eigenschaften und Beziehungen durch typische Merkmale, die ein Element einer Klasse genauer beschreiben (*Attribute*) spezifiziert, als auch in ihren dynamischen Verhaltensweisen (*Operationen* bzw. *Methoden*) beschrieben (siehe Abbildung 2-2). Die Anzahl der in einer assoziativen Beziehung stehenden Klassen wird durch die so genannte Kardinalität fest- oder variabel angegeben. Bei der Spezialisierung bzw. Generalisierung von Klassen erhalten die individuellen (Unterklassen) die Eigenschaften (Attribute, Operationen, Methoden) der übergeordneten (Oberklassen) im Sinne der Vererbung [Born et al. 2003; Fowler, Scott 2000; Schnieder 2007].

Eine Assoziation, die eine Teile-Ganzes-Beziehung beschreibt, wird als Aggregation bezeichnet, sofern die Teile unabhängig vom Ganzen existieren können. Teil-Ganzes-Beziehungen dagegen, bei denen die Existenz der Teile abhängig vom Ganzen ist, werden als Komposition bezeichnet [Born et al. 2003; Fowler, Scott 2000; Jeckle et al. 2004; Schnieder 2007].

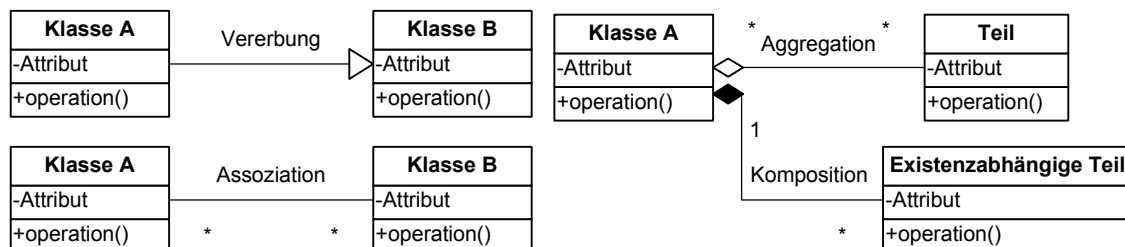


Abbildung 2-2 Klassendiagramm Notation [Jeckle et al. 2004]

## 2.3 Eigenschaften von Sensoren und Messsystemen

Werden Informationen bspw. von Verkehrszuständen und -objekten mit Sensoren erfasst, können diese unterschiedlich lokalisiert sein. Sie können sich am Fahrzeug oder im Fahrweg befinden. Es sind auch Lösungen oder Konzepte vorhanden, die Sensorkomponenten auf beiden Seiten erfordern.

Allgemein dienen Sensoren dazu Zustandsgrößen (z.B. die Position eines Fahrzeugs) zu erfassen und einer weiteren Verarbeitung zugänglich zu machen. Die Größen können hierbei sehr unterschiedliche physikalische Ausprägungen haben, wohingegen die Bereitstellung für eine Weiterverarbeitung heute meist über elektrische Signale erfolgt.

Ganz allgemein kann ein Sensor durch eine Funktion beschrieben werden, die eine (physikali-

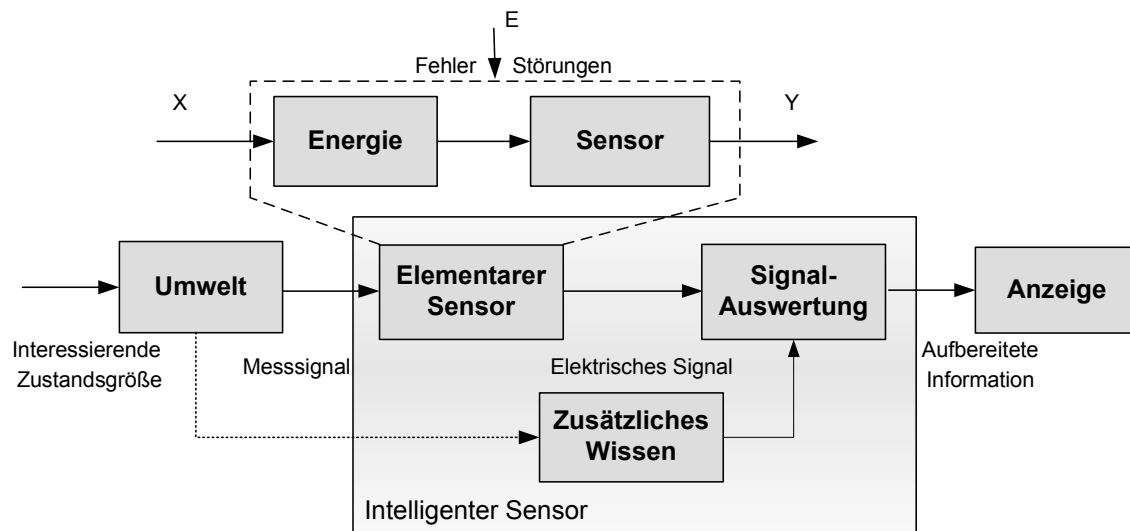
sche) Zustandsgröße  $X$  in eine (elektrische) Messgröße  $Y$  überführt:

$$Y = f(X) \quad (2-1)$$

Auf einen Sensor können zusätzliche Fehlereffekte ( $E$ ) einwirken, die ebenfalls in die Übertragungsfunktion eingehen:

$$Y = f(X, E) \quad (2-2)$$

Aufbauend auf die einfache Umsetzung der interessierenden Zustandsgröße in ein elektrisches Signal, wie dies bei elementaren Sensoren geschieht, kann eine nachfolgende Signalauswertung, die über zusätzliches Systemwissen verfügt, die für die jeweilige Fragestellung relevante Information aus dem elektrischen Signal ermitteln (siehe Abbildung 2-3).



**Abbildung 2-3 Allgemeine Grundstruktur eines Sensorsystems inklusive Auswertung**  
[Poliak, Hänsel 2007]

Um beispielsweise die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs mit rotierenden Achsen zu ermitteln, kann ein Impulsgeber eingesetzt werden, der bei jeder Umdrehung der Achse eine gewisse Anzahl an Impulsen liefert. Dieses Signal kann einer weiteren Nutzung jedoch normalerweise nicht ohne weiteres zugeführt werden. Hierzu ist eine zusätzliche Auswertungseinheit notwendig, die aus der elektrischen Impulsfolge eine Geschwindigkeitsinformation erzeugt, die dann weiteren Einheiten zur Verfügung gestellt werden kann.

Die Einheit aus elementarem Sensor und nachfolgender Signalauswertung wird *intelligenter Sensor* genannt [Poliak, Hänsel 2007; Schnieder 1993].

Neben der Klassifikation von Sensoren kommt der Klassifikation von typischen GNSS-Eigenschaften eine wichtige Rolle zu. Eine Beschreibung dieser umfangreichen und vielfältigen GNSS-Problematik würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Aus diesem Grund neben der Klassifikation von Sensoren auch ein Überblick über die GNSS-Eigenschaften gegeben.

## 2.4 Klassifikation von Sensoren

Eine allgemeine Klassifikation von Sensoren kann nach unterschiedlichen Kriterien durchge-

führt werden [Polke et al. 1994]. Im Folgenden werden einige Ansätze vorgestellt, die bei der anschließenden Betrachtung einzelner Sensoren und Messsysteme jeweils zur Anwendung gebracht werden.

Eine grundsätzliche, d. h., generische Strukturierung von Messsystemen kann nach folgenden Eigenschaften vorgenommen werden (siehe Abbildung 2-4).

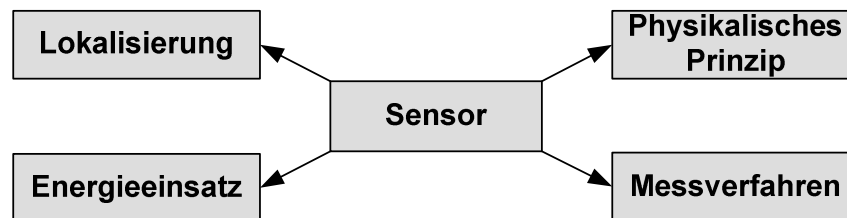


Abbildung 2-4 Klassifikation von Sensoren [Poliak, Hänsel 2007]

Die folgenden Abschnitte sind primär nach dem physikalischen Sensorprinzip geordnet und werden hinsichtlich ihrer elementaren Lokalisierung behandelt [DIN19259 1996].

## 2.4.1 Physikalische Ausprägung der Messgröße

Die Betrachtung der physikalischen Ausprägung der Messgröße stellt einen sehr allgemeinen Ansatz zur Klassifikation von Sensoren dar. Hierbei werden die Sensoren danach unterschieden, welchem physikalischen Messprinzip die zu messende Größe (Messgröße) zugrunde liegt (siehe Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7) [Schnieder 2007].

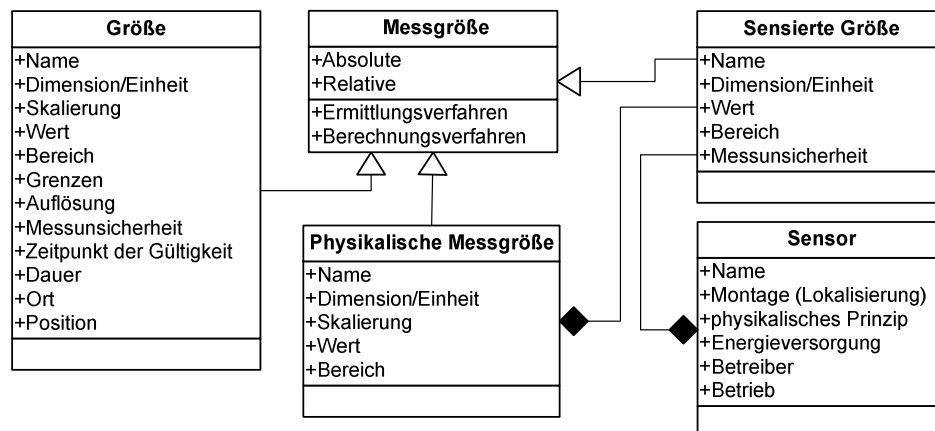
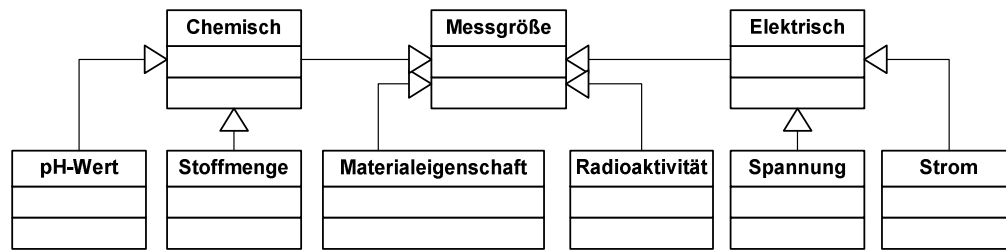


Abbildung 2-5 Zusammenhänge zwischen Messgröße, messtechnischen Begriffen und sensierter Größe nach [Schnieder 2007]

Die grundsätzliche Aufgabe ist, in allen Fällen die verlangte Messgröße durch einen geeigneten physikalischen Effekt zu bestimmen, wofür eine extrem große Zahl an Sensorprinzipien, technischen Ausführungen und Messsystemen zur Verfügung stehen [Bosch 2001; Juckenack 1989].

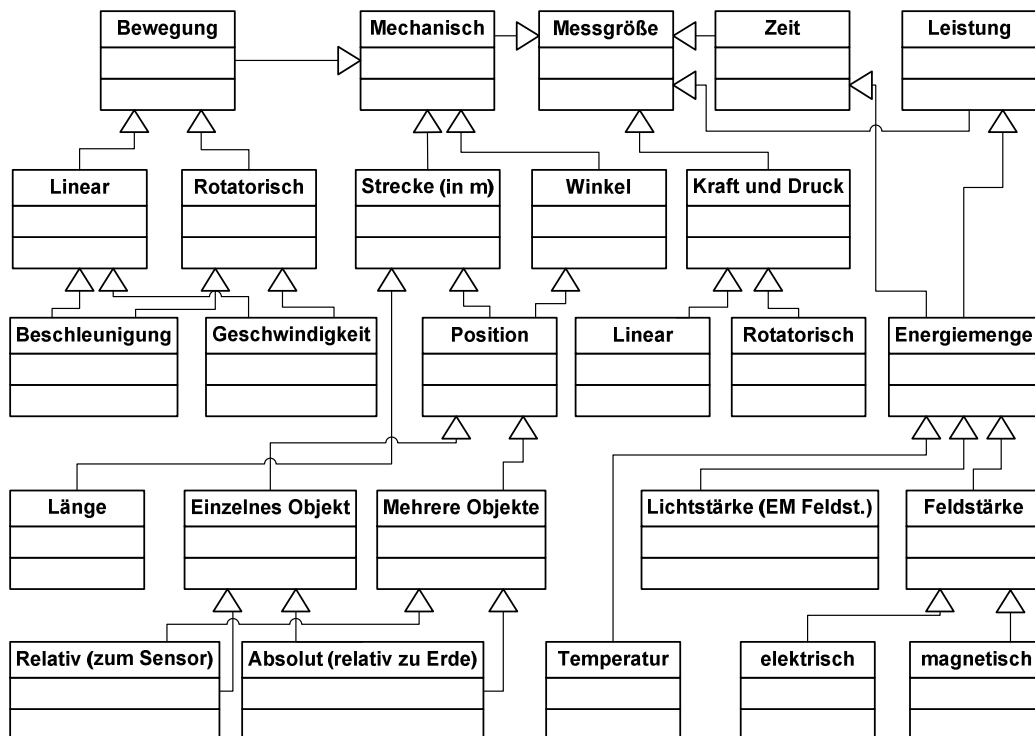
Das Klassendiagramm in Abbildung 2-5 zeigt den allgemeinen Zusammenhang zwischen sensierter Größe, und physikalischer Messgröße, während Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7 die physikalischen Ausprägungen im Einzelnen zeigen [Hecht, Schaser 2006; Rieckenberg 2004].

In dieser Einordnung muss auch berücksichtigt werden, dass Menschen im Verkehr viele Leitfunktionen ausführen und verkehrliche Zustände mit menschlichen Sinnesorganen, d. h. physiologisch erfassen [Schnieder, Schnieder 2007; Schnieder 2007].



**Abbildung 2-6 Klassifikation nach physikalischer Ausprägung der Sensorgröße (1/2)**  
[Poliak, Hänsel 2007]

Es wird eine hierarchische Strukturierung aufgebaut, die von allgemeinen physikalischen Einteilungen ausgeht und diese gegebenenfalls weiter verfeinert. In Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7 ist ein Klassendiagramm dargestellt, in dem diese hierarchische Strukturierung modelliert wurde [Bikker, Schroeder 2002; Puente 1959].



**Abbildung 2-7 Klassifikation nach physikalischer Ausprägung der Sensorgröße (2/2)**  
[Poliak, Hänsel 2007]

## 2.4.2 Lokalisierung des Sensors bzw. Messsystems

Bei Sensoren, die für die Erfassung von Daten im Verkehr eingesetzt werden, kann eine Einteilung bezüglich der Sensorposition gefunden werden. Hierbei kann ein Sensor nur *fahrzeugseitige* Komponenten beinhalten, ohne dass er zusätzliche eine streckenseitige Infrastruktur benötigt. Ein typisches Beispiel ist ein Doppler Radar (siehe Abschnitt. 3.1.2).

Andererseits kann ein Sensor rein *infrastrukturseitig* konzipiert sein, wobei er für seine Funktion keiner weiteren Ausrüstung der Verkehrsteilnehmer bedarf. Hier ist ein Gleisstromkreis (siehe Abschnitt 3.3.3) zu nennen. Als dritte Möglichkeit kann es eine *kombinierte Lösung* sein, die Komponenten am Fahrzeug sowie in der Strecke benötigen. Als anschauliches Beispiel ist ein GNSS basiertes Ortungssystem (siehe Kapitel 4) zu erwähnen. Ein entsprechendes Klassendiagramm ist in Abbildung 2-8 dargestellt [Poliak, Hänsel 2007].

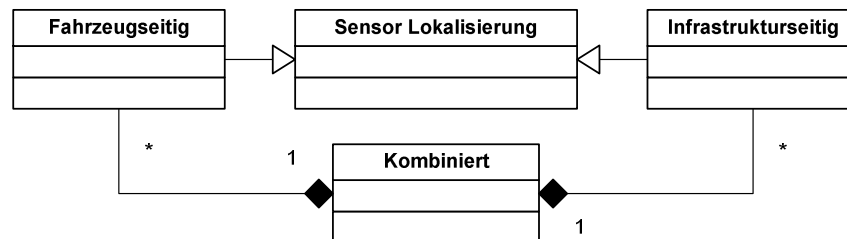


Abbildung 2-8 Ortsverteilung der Sensoren in Form eines Klassendiagramms [Poliak, Hänsel 2007]

### 2.4.3 Dynamisches Verhalten der Messgrößenerfassung

Eine Einteilung der Sensoren ist ebenfalls nach der Art, wann bzw. wie Informationen erzeugt werden, möglich. Hierbei gibt es eine Klasse von Sensoren, die bei bestimmten Ereignissen (ereignisdiskret) Informationen liefern. Eine andere Klasse von Sensoren liefert hingegen zeitdiskret oder permanent Messwerte (siehe Abbildung 2-9) [Poliak, Hänsel 2007].

Jede dieser Klassen hat hierdurch spezielle Charakteristika bezüglich der weiteren Informationsaufbereitung, die zu beachten sind [Schnieder 1999]. Gerade bei der Verwendung ereignisdiskreter Sensoren ist oft die Zeit zwischen den Ereignissen eine wichtige Information, sodass diese dann in die Informationsaufbereitung mit einbezogen werden muss [Poliak, Hänsel 2007].

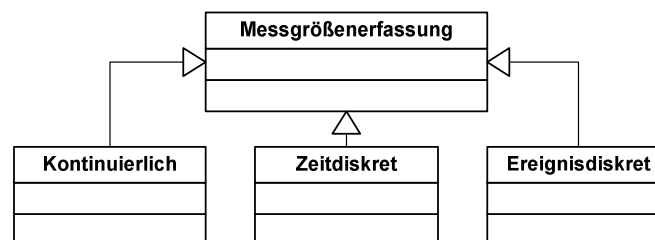


Abbildung 2-9 Messprinzipien in Form eines Klassendiagramms [Poliak, Hänsel 2007]

### 2.4.4 Energieeinsatz

Betrachtet man die für die Messverfahren benötigte Energie, so lassen sich zwei gegensätzliche Verfahren charakterisieren. Eines dieser Verfahren gibt seine Energie über den am Messverfahren beteiligten Sensor ab (z.B. Radarsensor) ein anderes Verfahren erfasst die vom Objekt ausgehende Energie mit einem Sensor (z.B. Transpondertechnik, Photodiode oder Thermoelement) zur Messwerterzeugung (siehe Abbildung 2-10). Auf dieser Basis ist ebenfalls eine Einteilung der Sensoren möglich, welche in Abschnitt 3.4.3 verdeutlicht wird [Poliak, Hänsel 2007].



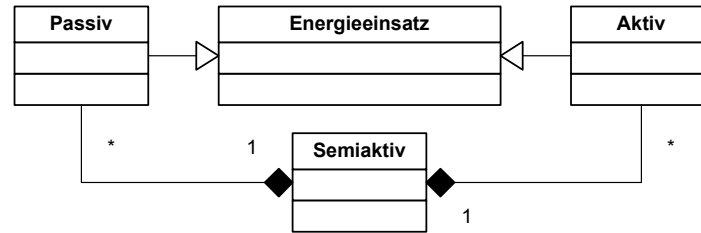


Abbildung 2-10 Energieeinsatz zur Messung in Klassendiagrammdarstellungen [Poliak, Hänsel 2007]

## 2.4.5 Prinzipielle Auswertungsverfahren

Bei der Auswertung von Messwerten können mehrere Klassen von Verfahren unterschieden werden (siehe Abbildung 2-11). Eine Klasse verwendet die *absoluten*, vom Sensor unmittelbar gelieferten Messwerte, in einer anderen Klasse werden die sensierten Größen kumuliert, um unter Verwendung von Umrechnungen die entsprechenden Informationen zu gewinnen, z.B. von Wegimpulsen bei einer Fahrt auf dem Weg oder von auf integrierter Beschleunigung auf die Geschwindigkeit und von dort weiter auf den Weg. Die dritte Klasse vergleicht die Messwerte des Sensors mit Referenzsignalen (oder -signalverläufen) um Übereinstimmungen zu erkennen. Aus den Übereinstimmungen, z.B. der zeitlichen Position, kann eine neue Information gewonnen werden. Die Sensoren dieser Klasse arbeiten nach dem *Korrelationsverfahren* und werden in Abschnitt 3.2.3.2 kurz erläutert [Schnieder 2007].



Abbildung 2-11 Prinzip der Messwertgewinnung in Form eines Klassendiagramms [Poliak, Hänsel 2007]

## 2.5 Metrologische Begriffe und Definitionen

Für die Anwendung dieser Arbeit gelten die Definitionen nach [EN9000 2000] und VIM [ISO VIM 2004] und die folgenden Begriffe.

### 2.5.1 Messmanagementsystem

Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Elementen, der zur Erzielung der metrologischen Bestätigung und zur ständigen Überwachung von Messprozessen erforderlich ist [DIN10012 2004; DIN17025 2005].

### 2.5.2 Messprozess

Satz von Tätigkeiten zur Ermittlung eines Größenwertes [DIN10012 2004; DIN17025 2005].

### **2.5.3 Messmittel**

Messgerät, Software, Messnormal, Referenzmaterial, Hilfsmittel oder eine Kombination davon, benötigt für einen Messprozess [DIN10012 2004; DIN17025 2005].

### **2.5.4 Metrologische Bestätigung**

Satz von notwendigen Tätigkeiten, um sicherzustellen, dass ein Messmittel die Anforderungen an seinen beabsichtigten Gebrauch erfüllt [DIN10012 2004; DIN17025 2005].

### **2.5.5 Qualifizierung**

Prozess zur Darlegung der Fähigkeit, festgelegte Anforderungen zu erfüllen [EN9000 2000].

### **2.5.6 Validierung**

Validierung nach (ISO/IEC 17025: 5.4.5.1) ist die Bestätigung durch Untersuchung und Bereitstellung eines Nachweises, dass die besonderen Anforderungen für einen speziellen beabsichtigten Gebrauch erfüllt werden [DIN17025 2005].

Die Validierung beschränkt sich grundsätzlich auf Einflussgrößen und Unsicherheitsmerkmale, die das Prüflabor bestimmen muss.

### **2.5.7 Verifizierung**

Verifizierung nach (ISO 9000: 3.8.4) ist die Bestätigung durch Bereitstellung objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind [EN9000 2000].

## **2.6 Auswertungsverfahren für die Wellenausbreitungssensorik**

Unter dem Begriff „Wellenausbreitungssensorik“ werden Sensoren zusammengefasst, die sich die Wellenausbreitungseigenschaften bestimmter Signale zur Abstands- und/oder Geschwindigkeitsmessung zunutze machen. Die Signale können dabei sowohl akustischer als auch elektromagnetischer Natur sein, also z.B. Ultraschall bzw. Mikrowellen oder Licht. Die gängigen Auswerteverfahren dieser Sensorklasse sind z.B. die Laufzeitmessung, Phasenmessung, Ausnutzung des Dopplereffektes oder Triangulationsverfahren [Schnieder 2007].

Da sämtliche Wellenausbreitungssensoren grundsätzlich auf einigen wenigen Messverfahren beruhen, werden diese im Folgenden kurz allgemein beschrieben.

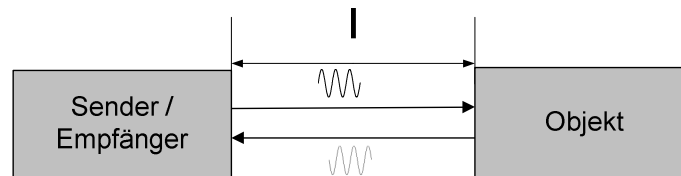
### **2.6.1 Messung der Laufzeit**

Die Messung einer Laufzeit bietet ein einfaches Verfahren zur Ermittlung der unmittelbaren Entfernung zwischen dem Sensor und einem Objekt. Hierfür wird von einem Sender ein Wellenpaket, d. h. ein pulsförmiges Signal, ausgesendet und die Zeit zwischen Emission und Auftreffen eines reflektierten Signalechos gemessen. Aus der Kenntnis der Ausbreitungsge-

schwindigkeit des verwendeten Signaltyps lässt sich daraus ein Distanzwert bestimmen. Das Verfahren basiert auf dem physikalischen Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Zeit und zurückgelegter Strecke<sup>2</sup>:

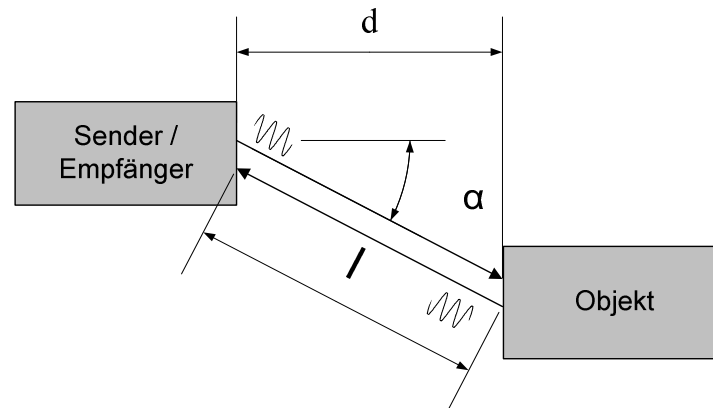
$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2-3)$$

Abbildung 2-12 skizziert den grundsätzlichen Aufbau einer solchen Laufzeitmessung. Ein vom Sender emittiertes Wellenpaket wird an einem Objekt im Abstand  $l$  reflektiert und schließlich vom Empfänger detektiert. Der vom Signal zurückgelegte Weg beträgt  $2l = \Delta s$ . Durch Messung der Laufzeit  $\Delta t$  lässt sich die Distanz  $l$  demzufolge berechnen zu  $0,5 \cdot v \cdot \Delta t$  [Poliak, Hänsel 2007].



**Abbildung 2-12 Grundprinzip der Laufzeitmessung [Poliak, Hänsel 2007]**

Das in Abbildung 2-12 vereinfacht vorgestellte Prinzip der Laufzeitmessung ermittelt radiale Abstände. Ist eine Darstellung in kartesischen Koordinaten (z.B. gemäß [DIN70000 1994]) gewünscht, ergibt sich die in Abbildung 2-13 dargestellte Anordnung:



**Abbildung 2-13 Distanzmessung durch Laufzeitmessung in kartesischen Koordinaten [Poliak, Hänsel 2007]**

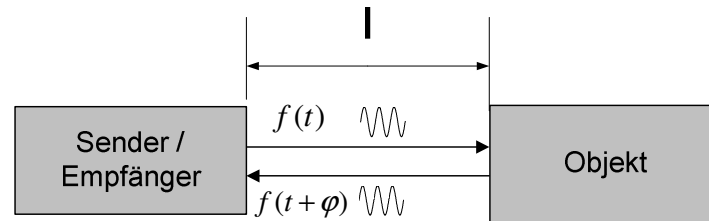
Durch einfache trigonometrische Beziehungen lassen sich aus dem Winkel des Signals  $\alpha$  und der durch Laufzeitmessung ermittelten radialen Distanz  $l$  die entsprechenden kartesischen Koordinaten des Messpunktes ermitteln [Schnieder 2007].

## 2.6.2 Messung der Phasenverschiebung

Bei diesem Verfahren der Entfernungsbestimmung wird die Phasenverschiebung eines

<sup>2</sup> Es wird hierbei vereinfachend angenommen, dass innerhalb der vom Signal überbrückten Strecke kein Übergang zwischen unterschiedlichen Medien stattfindet.

Signals genutzt. Diese ist Bestandteil der bereits beschriebenen Laufzeitmessung. Während bei der einfachen Laufzeitmessung die Zeit zwischen diskreten Ereignissen (Emission und Empfang eines Wellenpakets) bestimmt wird, wird bei der Phasenverschiebungsmessung kontinuierlich das empfangene Signal mit dem emittierten (im Allgemeinen ebenfalls kontinuierlich modulierten) Signal verglichen (siehe Abbildung 2-14) [Poliak, Hänsel 2007].



**Abbildung 2-14 Prinzip der Entfernungsmessung durch Phasenverschiebung nach [Lux 2006]**

Durch Kenntnis der Frequenz  $f$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$  des emittierten Signals lässt sich mit der Phasenverschiebung  $\varphi$  die Entfernung  $l$  berechnen:

$$l = \frac{\varphi \cdot \lambda}{4 \cdot \pi} \quad (2-4)$$

Dabei ist zu beachten, dass bei der Verwendung von periodischen Signalen aufgrund der Periodizität (Aliasing)-Fehler<sup>3</sup> auftreten können, wenn die Entfernung  $l$  die halbe Wellenlänge des verwendeten Signals überschreitet [Poliak, Hänsel 2007].

### 2.6.3 Messung der Frequenzverschiebung (Dopplereffekt)

Unter dem Begriff „Dopplereffekt“ wird ein Phänomen beschrieben, dass eine Frequenzverschiebung zwischen einem emittierten und empfangenen Signal bewirkt, wenn sich Sender und/oder Empfänger bewegen. Der Effekt ist abhängig von den Beträgen und Richtungen der Geschwindigkeiten von Sender und Empfänger. Aus der Kenntnis der ursprünglich gesendeten Frequenz lässt sich so die Geschwindigkeit ermitteln [Poliak, Hänsel 2007].

Die Stärke des Dopplereffektes ist ebenfalls abhängig davon, ob das verwendete Signal zur Ausbreitung eines Mediums bedarf (Schall) oder nicht (elektromagnetische Wellen). Den letzteren dieser beiden Fälle bezeichnet man auch als optischen Dopplereffekt. Der optische Dopplereffekt resultiert aus einer Relativbewegung von Empfänger und Sender. Bei dem an ein Trägermedium gebundenen Dopplereffekt muss zwischen den Bewegungen bzw. Geschwindigkeiten von Sender und Empfänger differenziert werden, da beide unterschiedliche Phänomene unterschiedlicher Stärke bewirken. Beide Effekte können jedoch in einer einzigen Formel zusammengefasst werden. Exemplarisch seien hier die Formeln für ein sich aufeinander zu bewegendes Sender-Empfänger-Paar angegeben. Die Frequenzverschiebung für ein akustisches Signal ergibt sich nach [Gottwald et al. 1995]:

<sup>3</sup> Unter Aliasing versteht man den Effekt, dass zwei oder mehrere unterschiedliche Messwerte auf denselben Wert abgebildet werden. Es ist in diesem Fall nicht möglich, zwischen den ursprünglichen Größen zu differenzieren.

$$f' = f \cdot \left( \frac{c + v_E}{c - v_S} \right) \quad (2-5)$$

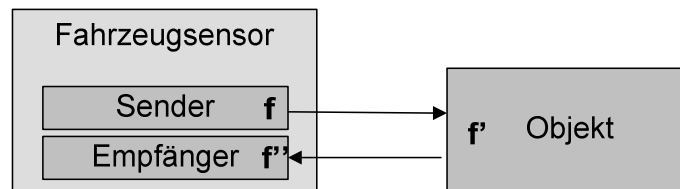
$c$  = Ausbreitungsgeschwindigkeit der verwendeten Signalquelle,  $v_E$  = Betrag der Geschwindigkeit des Empfängers,  $v_S$  = Betrag der Geschwindigkeit des Senders,  $f'$  = vom Empfänger empfangener Frequenz,  $f$  = vom Sender emittierte Frequenz

Für den optischen Dopplereffekt hingegen ergibt sich folgender Zusammenhang [Gottwald et al. 1995]:

$$f' = f \cdot \sqrt{\frac{c + v_r}{c - v_r}} \quad (2-6)$$

$c$  = Lichtgeschwindigkeit,  $v_r$  = Betrag der Relativgeschwindigkeit

Bei der Auswertung von Dopplerverfahren in Fahrzeugsensoren ist zu beachten, dass ein doppelter Dopplereffekt auftritt. Sobald das vom Fahrzeugsensor mit der Frequenz  $f$  emittierte Wellenpaket auf einem Objekt auftrifft (Frequenz  $f'$ ), wird dieses zum Sender des reflektierten Signals, das schließlich vom Fahrzeugsensor mit der Frequenz  $f''$  empfangen wird (siehe Abbildung 2-15) [Lux 2006].



**Abbildung 2-15 Prinzip des Dopplereffektes bei Fahrzeugsensoren [Poliak, Hänsel 2007]**

Der Radarsensor liefert die Geschwindigkeit über Grund durch berührungslose Messungen, indem ein Mikrowellenbündel schräg auf den Boden abgestrahlt wird (siehe Abbildung 2-16). Eine von den Bodenunebenheiten diffus reflektierte und am Ort des Senders wieder empfangene Welle ist aufgrund der Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Boden nach dem Dopplereffekt in ihrer Frequenz verschoben [Gottwald et al. 1995; Klinge 1998].

$$f_{\text{Differenz}} = f_{\text{Sendr}} \cdot \frac{2 \cdot v_{\text{Fahrzeug}}}{c_0} \cdot \Phi \cos \Phi \quad (2-7)$$

Diese Frequenz hängt auch vom Abstrahlwinkel zur Horizontalen ab. Durch Nichtparallelitäten im abgestrahlten Mikrowellenbündel ergibt sich hieraus eine Aufweitung der Dopplerfrequenzen im Frequenzspektrum  $U(f)$ , für die detaillierte Beschreibung siehe [Gottwald et al. 1995; Klinge 1998].

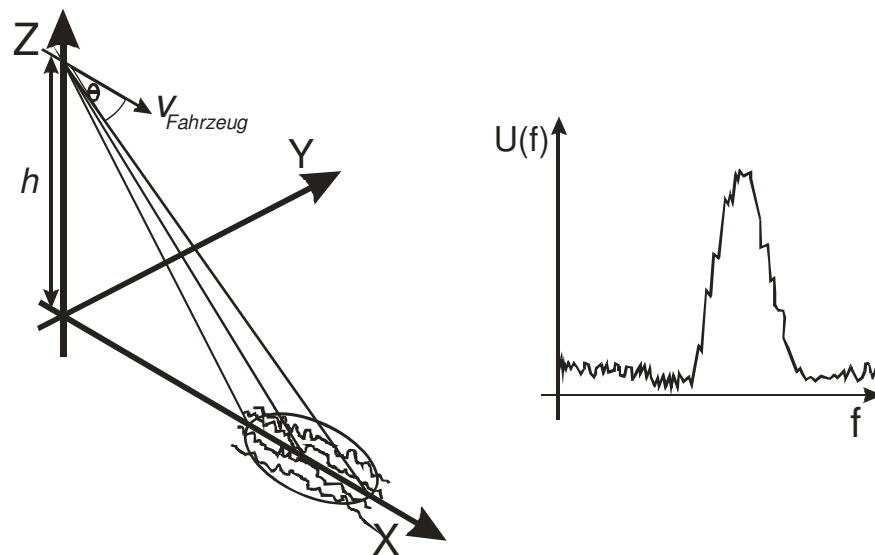


Abbildung 2-16 Radarsensor nach dem Dopplerprinzip – Frequenzverschiebung [Klinge 1998]

## 2.6.4 Korrelation

Das Korrelationsverfahren ist in den Bereichen Messtechnik und Sensorik von großer Bedeutung. Angewendet auf eine beliebige Funktion (Messsignal S1, siehe Abbildung 2-17) mit einer gewünschten zweiten Funktion (Messsignal S2, siehe Abbildung 2-17) liefert es allgemein betrachtet stets ein Maß dafür, wie ähnlich sich die zu untersuchenden Funktionen sind. Die Funktionen können grundsätzlich kontinuierlich oder zeitdiskret sein [Böhringer 2008].

Die Geschwindigkeitsmessung z.B. aus den Wirbelstrom-Sensorsignalen (siehe Abschnitt 3.2.3.2) wird nach dem Prinzip der Laufzeitkorrelation durchgeführt. Die Signale stammen aus im Abstand  $l$  montierten Sensoren und werden kanalweise aufbereitet. Die demodulierten Sensorsignale sind, wie in Abbildung 2-17 dargestellt, im Idealfall identisch, allerdings um eine Laufzeit  $T$  gegeneinander verschoben; hierbei spielt die Form der Sensorsignale prinzipiell keine Rolle [Engelberg 2001; Geistler 2006].

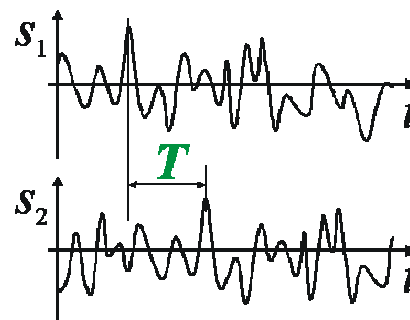
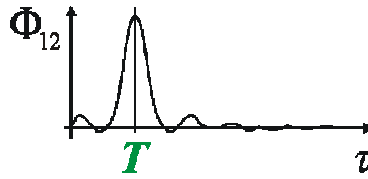


Abbildung 2-17 Korrelierte Sensorsignale [Engelberg 2001; Geistler 2006]

Die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) der Signale, welche in Abbildung 2-18 skizziert ist, besitzt ein ausgeprägtes Maximum an der Stelle  $T$ , wenn also die Eingangssignale gerade um ihre Laufzeit gegeneinander verschoben werden [Engelberg 2001; Geistler 2006].



**Abbildung 2-18 Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) [Geistler 2006]**

Aus dieser Laufzeit  $T$  lässt sich mithilfe des Sensorabstands  $l_s$  die momentane Fahrzeuggeschwindigkeit berechnen, indem der Sensorabstand durch die Laufzeit dividiert wird.

$$v = \frac{l_s}{T} \quad (2-8)$$

Ein derart realisierter Aufbau kann z.B. Fahrzeuggeschwindigkeiten berührungslos und damit schlupffrei messen. Aufgrund der hohen Präzision der Messwerte ist die Drift gewonnener Wegmessung im Vergleich zu handelsüblichen Odometern sehr gering [Geistler 2006; Engelberg 2001].

## 2.7 Zusammenfassung

In vorherigen Abschnitten werden die allgemeinen Eigenschaften von Sensoren und Messsysteme betrachtet und deren strukturierte Klassifikation erläutert.

Um die Klarheit eines Vorgehens sicher zu stellen, ist es notwendig, dass alle Beteiligten über dasselbe Verständnis des Gegenstandsbereichs verfügen. Hierzu gehört insbesondere ein einheitliches Verständnis von Begriffen und den dazugehörigen Benennungen. Das generische Begriffskonzept, welche durchgängig in der Arbeit angewendet wird, wurde eingeführt und erläutert.

Einige grundlegende metrologische Begriffe und Definitionen, welche ihre Anwendung in dieser Arbeit gefunden haben, sind hier aufgelistet.

Eine allgemeine Klassifikation von Sensoren kann nach unterschiedlichen Kriterien durchgeführt werden [Polke et al. 1994]. Es wurden einige Ansätze vorgestellt, die bei der anschließenden Betrachtung einzelner Sensoren und Messsysteme jeweils zur Anwendung gebracht wurden. Die grundlegende Klassifizierung von Sensoren wurde mit formalen Beschreibungsmitteln dargestellt.

# 3 Terrestrische Messsysteme und Sensorik zur Ortung im Eisenbahnbereich

Die Aufgaben der Ortung werden mit einer Reihe von Komponenten in den Systemen der Verkehrsleittechnik realisiert. Speziell auf die Erfüllung einer leittechnischen Aufgabe abgestimmt, ermitteln sie die notwendigen Ortungsinformationen. Damit sind diese Messsysteme und Sensoren von der Realisierung der leittechnischen Systeme geprägt [Leinhos 1996]. Anschließend werden kurz die wesentlichen Eigenschaften der einzelnen Signal- bzw. Sensortypen vorgestellt. Die Beschreibungen beschränken sich dabei auf die im Eisenbahnbereich eingesetzten Verfahren [Poliak, Hänsel 2007].

## 3.1 *Elektromagnetische und akustische Sensoren*

Der Bereich der elektromagnetischen Sensoren umfasst ein breites Spektrum verschiedener Sensoren. Hierbei bestimmt die Wellenlänge des zu detektierenden Signals maßgeblich sowohl die Charakteristika des Sensors (wie z.B. Empfindlichkeit gegenüber Witterungseinflüssen) als auch die Art des Messverfahrens (z.B. aktiv oder passiv) und der Signalverarbeitung. In den folgenden Unterabschnitten wird jeweils ein Sensortyp dargestellt, indem die zugrunde liegenden Messprinzipien genannt werden [Lux 2006; Schnieder 2007]. Elektromagnetische Wellenausbreitungen mit Blick auf GNSS-Anwendungen werden detaillierter in Abschnitt 4.8 behandelt.

### 3.1.1 Akustische Sensoren (Ultraschall)

Als Ultraschall bezeichnet man den Frequenzbereich oberhalb der Wahrnehmungsgrenze des menschlichen Gehörs. GHz [Frasca et al. 2004; Lux 2006]. Es existieren diverse Verfahren, Ultraschall zu erzeugen und zu detektieren, z.B. über piezoelektrische Kristalle.

Die Mehrzahl der Ultraschall-basierten Sensoren nutzt die Laufzeitmessung zur Entfernungsmessung. Problematisch bei der Verwendung von Ultraschall ist die Kenntnis der Schallgeschwindigkeit zur Entfernungbestimmung. Der Betrag (der Schallgeschwindigkeit) hängt stark von dem Übertragungsmedium ab und ist daher teils auch lokal stärkeren Schwankungen unterworfen, die sich entsprechend in Messfehlern bei der Berechnung von Objektentfernungen widerspiegeln. Für die Bestimmung der Geschwindigkeit von Objekten kann der Dopplereffekt ausgenutzt werden. Wie eingangs erwähnt, sind die Zusammenhänge für den Dopplereffekt bei Schallwellen etwas komplexer, da zwischen den Bewegungen des eigenen Fahrzeugs und der Objekte differenziert werden muss [Poliak, Hänsel 2007].

Oftmals werden mehrere Ultraschallsensoren zur Erfassung größerer Bereiche verwendet. Um bei mehreren Sensoren unerwünschten Crosstalk, also Verfälschungen der Messergebnisse durch „Übersprechen“ zwischen unterschiedlichen Sensoren zu vermeiden, müssen etwas ausgefeiltere Verfahren als eine simple Laufzeitmessung verwendet werden [Frasca et al. 2004].

---



Der große Vorteil von Ultraschallsensoren besteht in ihrem günstigen Preis. Dem gegenüber steht jedoch auch eine geringe Reichweite von nur wenigen Metern. Je nach Sensortyp werden hierfür Maximalreichweiten im Bereich von 1,5 bis 5 Meter angegeben [Bosch 2001]. Hierdurch ist ihr Anwendungsgebiet stark eingeschränkt.

Ein weiterer Nachteil der Ultraschallsensoren ist ihre relativ geringe Genauigkeit. Diese beruht größtenteils auf dem zugrunde liegenden Messprinzip bzw. dem verwendeten Signal, dem Schall. Da der Betrag der Schallgeschwindigkeit Schwankungen unterworfen ist, schlägt sich die Differenz zwischen angenommener und tatsächlicher Schallgeschwindigkeit in Messfehlern bei der Berechnung der Objektentfernung nieder [Lux 2006].

### 3.1.2 Radar

Das Akronym *Radar* steht für Radio (frequency) Detection and Ranging und vermittelt bereits einen ersten Eindruck über den verwendeten Frequenzbereich. Die Nutzung von elektromagnetischen Signalen in diesem Frequenzbereich unterliegt europaweit staatlichen Regulierungen; Frequenzbänder dürfen nur für bestimmte Anwendungen genutzt werden, um einen ungestörten Betrieb sämtlicher Nutzer zu gewährleisten. In Deutschland und Europa ist der Bereich von 76-77 Gigahertz für das so genannte Long Range Radar (LRR) reserviert. Neben dem LRR-Frequenzband wurde 2005 für einen befristeten Zeitraum (bis einschließlich 2013) EU-weit ein zusätzliches Frequenzband bei 24 Gigahertz, das so genannte „Short Range Radar“ (SRR), freigegeben. Zukünftige Radarsysteme sollen ab 2013 ein weiteres Frequenzband bei 79 Gigahertz nutzen [Europa-Rapid-Press Releases 2005]. Radarsignale sind Mikrowellen im Zentimeterbereich oder darunter [Schnieder 2007; Nathanson et al. 1991].

Radarsensoren werden nahezu ausschließlich als intelligente Sensoren angeboten, in der Regel ist eine Signalverarbeitungseinheit direkt in dem Sensorgehäuse integriert [Horn 2006].

Neben den Antennen und einer Recheneinheit besitzen Radarsensoren in der Regel einen Frequenzmischer, der eine Isolation der Zwischenfrequenz zur weiteren (digitalen) Signalverarbeitung ermöglicht. Unter Zwischenfrequenz versteht man im Wesentlichen die durch den Dopplereffekt entstandene Frequenzverschiebung des Radarsignals. Während das eigentliche Radarsignal sehr hochfrequent ist (Gigahertz-Bereich), bewegt sich die Zwischenfrequenz im Kilohertz-Bereich, was die nachgelagerte Digitalisierung und digitale Signalverarbeitung erheblich erleichtert [Lux 2006; Poliak, Hänsel 2007].

### 3.1.3 Lidar/Ladar

Das Akronym Lidar, „Light Detection and Ranging“ (gelegentlich auch Ladar, „Laser Detection and Ranging“, da zumeist ein Laser als Lichtquelle verwendet wird) lässt bereits eine Artverwandtschaft zu den im Automobilbereich zurzeit noch verbreiteteren Radar-Sensoren erkennen. Als Signalquelle wird zumeist ein Laser im nahen Infrarotbereich verwendet. Die Mehrzahl der Messverfahren basiert dabei auf einer Laufzeitmessung des Signals [Naturtoday 2005; Siemens 2006].

Physikalisch betrachtet unterscheiden sich Lidar und Radar zunächst nur in der Frequenz bzw. Wellenlänge ihres Trägersignals. Dieser Unterschied bedingt jedoch weitere Differenzen sowohl im Messverfahren als auch im Messverhalten, bedingt durch die unterschiedlichen Reflexions- bzw. Transmissions- und Absorptionseigenschaften der Umwelt bei diesen Wellenlängen. Hier ist insbesondere das Schlechtwetterverhalten zu nennen. Gegenüber

Radarwellen wird Licht an Niederschlagsteilchen relativ stark gestreut. Ursprünglich bestand hierin der größte Nachteil der Lidarsysteme gegenüber dem Radar. In heute erhältlichen Systemen kann dieses Problem durch ausgeklügelte Auswertungsverfahren jedoch weitestgehend kompensiert werden. Beispielsweise werden bei der so genannten Mehrfachechoauswertung für jeden Laserpuls mehrere Signalechos registriert und durch intelligente Softwarealgorithmen klassifiziert. Hierdurch kann bereits ein Großteil der „Phantomechos“, Signalechos die durch Reflexion des Laser-Pulses an Niederschlagsteilchen erzeugt wurden, als Regenkontakte erkannt und aussortiert werden. Nach Herstellerangaben [Siemens 2006; Brumm 2005] lässt sich durch diese Maßnahmen ebenfalls eine hohe Robustheit gegenüber widrigen Wetterbedingungen erreichen [Troppmann, Hüger 2000; Rohling, Lissel 77; Lux 2006].

### **3.1.4 (Stereo-)Kamerasysteme**

Stereo-Kamerasysteme stellen einen Sonderfall der Wegausbreitungssensoren dar. Es handelt sich um einen passiven Sensor, der im Allgemeinen keiner eigenen Signalquelle bedarf, statt dessen wird im Bereich des sichtbaren Lichts die natürliche Ausleuchtung der Umwelt durch Tageslicht (oder z.B. Scheinwerferlicht bei Nacht) genutzt [Riedel et al. 2005; Xu et al. 1998]. Im Wesentlichen beruht die Stereovision auf einer für jeden Pixel zweier Kameras durchgeführten Triangulation. Voraussetzung für eine hohe Genauigkeit bei diesem Verfahren ist, dass der räumliche Versatz der beiden Kameras exakt bekannt ist und während der Messungen konstant bleibt. Letzterer Punkt führt insbesondere zu einer Begrenzung des maximalen Abstands zwischen den beiden Kameras. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Zuordnung von Pixeln eines Objektes einer Kamera zu den korrespondierenden Pixeln der anderen Kamera. Diese Problematik wird durch entsprechende Software-Algorithmen gelöst. Die Berechnung der Objektentfernung erfolgt dann über den relativen Versatz des jeweiligen Pixels auf dem entsprechenden Kamerachip sowie über die relative Lage der zweiten Kamera. Demzufolge ist die erreichbare (Distanz-) Auflösung eines Stereo-Kamerasystems direkt abhängig von der Auflösung der verwendeten Kameras. Dies wird zusätzlich noch durch die aufgrund der Genauigkeit des Systems geforderte räumliche Nähe der Kameras verschärft, da hierdurch per se der relative Versatz zwischen den jeweiligen Pixeln tendenziell geringer ausfällt [Xu et al. 1998; Poliak, Hänsel 2007].

Das Potenzial solcher Systeme lässt sich an dem biologischen Vorbild, dem menschlichen Auge – genauer gesagt unserem Augenpaar – sowie der Verarbeitung dieser Bilddaten durch das menschliche Gehirn, erahnen. Von derartigen Leistungen sind aktuelle Stereo-Kamerasysteme jedoch noch weit entfernt [Xu et al. 1998; Poliak, Hänsel 2007].

## **3.2 Fahrzeugseitige Sensoren**

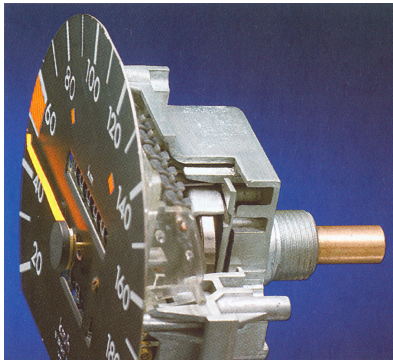
Der Bereich der Fahrzeugsensorik umspannt ein sehr weites Feld sowohl von Sensoren, Messgrößen als auch -verfahren. Sensoren sind die „Wahrnehmungsorgane“ des Fahrzeugs, sie wandeln physikalische Größen in elektrische Signale um, die von der Bordelektronik ausgewertet werden können [Wald 1998; Lux 2006].

### **3.2.1 Tachometer**

Eine der ältesten Fahrerinformationen ist die der Geschwindigkeit. Im Jahr 1902 wurde hierfür von Otto Schulze ein Patent eingereicht. Der Name des Tachometers (kurz Tacho genannt) leitet sich vom griechischen Wort tachis (ταχης), das schnell bedeutet, ab. Es ist

allerdings darauf hinzuweisen, dass es sich beim Tachometer nicht um einen Sensor, sondern um ein Anzeigedisplay für Sensordaten handelt (siehe Abbildung 3-1).

Das älteste Sensor-Prinzip der Geschwindigkeitserfassung für die Tachometer, wie sie bereits von Otto Schulze patentiert wurde, funktioniert nach dem Prinzip des Wirbelstroms. Hierbei wird ein Magnet über eine Welle, deren Drehzahl mit der Fahrzeuggeschwindigkeit in Beziehung steht, gedreht. Über dem Magneten befindet sich eine Metallscheibe, an der dieser Magnet vorbeidreht. Durch die Induktion von Wirbelströmen in dieser Platte entsteht eine Kraft, die die Platte dem Magneten folgen lässt [Poliak, Hänsel 2007].



**Abbildung 3-1 Mechanischer Tachometer [Blume, Wesner 2002]**

Die Kraft, die hierbei von der Platte ausgeübt wird, ist direkt abhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und lässt sich über einen Zeiger, der an der Platte angebracht ist, anzeigen. Die aktuellen Tachometer funktionieren allerdings elektronisch [Poliak, Hänsel 2007].

### 3.2.2 Beschleunigungssensoren

Beschleunigungssensoren werden dazu genutzt, die Beschleunigung in einer festgelegten Koordinatenrichtung (translatorisch) oder Drehrichtung (rotatorisch) zu bestimmen. Aus den ermittelten Beschleunigungswerten können mithilfe der Integration und unter Angabe der Anfangsbedingungen Geschwindigkeit und Weg bzw. Winkelgeschwindigkeit und Winkel bestimmt werden. Die Beschleunigung wird dabei direkt oder indirekt über das 1. Newtonsche Axiom als Kraft, die auf eine beschleunigte Masse wirkt, zugänglich. Das 1. Newtonsche Axiom besagt, dass *ein Körper in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung verharrt, solange die Summe aller auf ihn einwirkenden Kräfte Null ist.*

Die Kraft bzw. das Moment lenkt entweder eine Feder aus, deren Auslenkung z.B. kapazitiv oder optisch gemessen wird, oder wird bei kompensatorisch arbeitenden Verfahren mit einer messtechnisch gut zugänglichen Gegenkraft bzw. Gegenmoment ausgeglichen.

Beschleunigungssensoren werden in der Bahntechnik nach wie vor z.B. in der Linienzugbeeinflussung LZB 80 [Murr 1991] zur Stützung der Wegmessung von Radimpulsgebern bei starkem Schlupf der angetriebenen und gebremsten Räder verwendet. Die Messunsicherheiten können auf diese Weise wesentlich verringert werden.

Transversal- und Drehbeschleunigungen außerhalb des zulässigen Messbereichs führen zum Verkippen. Dadurch kann es zu Verspannungen kommen, die Fehler durch ein geändertes Frequenzverhalten bewirken.

Um durch unbekannte Beschleunigungen - Erdbeschleunigung, Zentrifugalbeschleunigung - auf Messungen rückwirkende Fehler zu eliminieren, sollte der Beschleunigungsaufnehmer immer eine definierte Lage gegenüber einem erdfesten Koordinatensystem beibehalten. Das gelingt meistens nur durch die Lagerung auf einer Kreiselplattform, die eine elegante und gleichzeitig aber auch teure Möglichkeit darstellt, um den Einfluss der Erdbeschleunigung ohne Kenntnis der Geometrie des Streckenverlaufs zu eliminieren. Mit der Zerlegung in ein Koordinatensystem geben die Richtungen senkrecht zum Lot die Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung an, während die Messung in Lotrichtung die Beschleunigung in vertikaler Richtung liefert.

Kreiselplattformen haben zudem den entscheidenden Nachteil, dass man die Montageorte der Einzelsensoren nicht frei wählen kann, sondern einen zentralen und geschützten Standort vorgeben muss [Klinge 1998].

Optische Kreisel entsprechen in der Leistungsfähigkeit fast dem mechanischen Kreisel, sind aber bei weitem nicht so teuer. Beim optischen Kreisel wird der Sagnac-Effekt ausgenutzt, um die Drehung des Systems um die eigene Achse festzustellen vgl. [Physikevolution 2008]. Dabei wird linear polarisiertes Licht zuerst in zwei Strahlen aufgeteilt und anschließend durch Spiegel umgelenkt oder in einer Glasfaserschleife in die entgegengesetzte Richtung auf eine Kreisbahn geschickt. Anschließend werden die Strahlen wieder am Ausgangsort zusammengeführt und detektiert. Da die beiden Strahlen den gleichen Weg zurückgelegt haben, werden sie auch gleichzeitig an dem Ausgangsort eintreffen, sofern das System nicht rotatorisch bewegt wurde. Sollte aber das System mit einer Rotationsgeschwindigkeit  $\Omega$  gedreht werden, so kommt das Licht eines der beiden Drehsinne früher zum Detektor. Damit ist es möglich die Drehrichtung und damit auch die Fahrtrichtung des Fahrzeugs zu erkennen [Schnieder 2007].

Beschleunigungssensoren besitzen eine hohe Verfügbarkeit und weisen durch ihre meist geschützte Lage kaum Fehler durch Umgebungsbedingungen auf. Ihre Leistungsfähigkeit definiert sich aus der Drift, dem Rauschen, der Auflösung und den Maximalwerten der mechanischen Belastbarkeit.

Die bei geringen Kosten starke Drift der Beschleunigungssensoren ermöglicht nur die kurzzeitige Nutzung zur Geschwindigkeits- oder Wegermittlung. Insofern werden diese zumeist nur zur Überbrückung von Ausfällen anderer Sensoren genutzt, deren abgeschätzte Messabweichungen dadurch stark reduziert werden können [Poliak, Hänsel 2007].

### 3.2.3 Odometer

Durch den Odometer wird die gefahrene Strecke gemessen. Dieses kann durch die Integration der Momentangeschwindigkeit oder das Aufsummieren der gefahrenen Wegeinheiten erfolgen. Diese werden direkt aus Wegmarken (Wirbelstromsensor) oder indirekt über mechanische Kontaktierung (Radimpulsgeber) oder Reibkraftübertragung ermittelt.

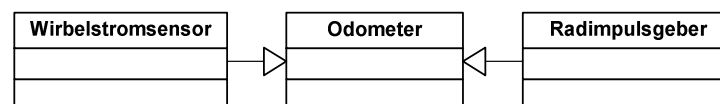


Abbildung 3-2 Beispiel für direkte und indirekte Odometer [Poliak, Hänsel 2007]

### 3.2.3.1 Radimpulsgeber

Die einfachste Ausführung eines Odometers ist der Radumdrehungszähler. Es werden die Umdrehungen eines Rades gezählt. Durch die Multiplikation der Umdrehungen mit dem mittleren Umfang des Rades erhält man so die gefahrene Strecke.

$$x = \pi \cdot d \cdot n \quad (3-1)$$

Der Radimpulsgeber registriert Drehzahländerungen und die Drehrichtung. Er sendet bei jeder Drehung der Achse Wegimpulse. Anhand dieser Wegimpulse wurde unter Berücksichtigung des Raddurchmessers die gefahrene Wegstrecke, die Fahrtrichtung, die aktuelle Geschwindigkeit und Beschleunigung berechnet [SUBSET 2002].

Einerseits zählen zu den Vorteilen die einfache und preisgünstige Realisierung, andererseits sind einige Nachteile zu nennen wie z.B. Schlupf am Rad. Hierdurch sind Abweichungen nicht zu vermeiden sowie die Abhängigkeit von Veränderung des Raddurchmessers z.B. durch Abnutzung [Poliak, Hänsel 2007].

### 3.2.3.2 Wirbelstromsensor

Der Wirbelstromsensor ist in der Lage, metallische Inhomogenitäten (z.B. Schienenbefestigung im Gleisbereich) zu detektieren. Ermöglicht wird dies durch einen magnetischen Sensor, welcher aus einer Erregerspule E und zwei Empfängerspulen P1 und P2 besteht. Die Erregerspule erzeugt ein Wechselmagnetfeld. Dieses führt in metallischen Bauteilen zur Ausbildung von Wirbelströmen [Böhringer 2008]. Die Wirbelströme erzeugen ihrerseits wiederum ein Magnetfeld, welches sich mit dem Erregermagnetfeld überlagert. Das resultierende Magnetfeld beeinflusst die in Differenz geschalteten Empfängerspulen. Der prinzipielle Aufbau des Sensors ist in Abbildung 3-3 zu sehen [Geistler 2006; Engelberg 2001].

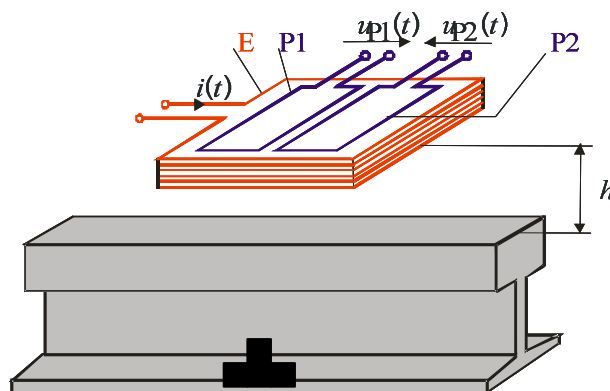


Abbildung 3-3 Prinzip des Wirbelstromsensors [Engelberg 2001; Geistler 2006]

Die Geschwindigkeitsmessung aus den Wirbelstrom-Sensorsignalen wird nach dem Prinzip der Laufzeitkorrelation durchgeführt. Die Signale der beiden im Abstand  $l$  montierten Wirbelstrom-Sensoren werden zunächst kanalweise aufbereitet. Für die Auswertung der Signale wird das Korrelationsverfahren verwendet (siehe Abschnitt 2.4.4) [Geistler 2006; Engelberg 2001]. Der Wirbelstrom-Sensor erfüllt zugleich zwei Aufgaben. Zum einen wird eine berührungslose Geschwindigkeits- und Wegmessung realisiert, welche schlupffrei arbeitet und dadurch mit wesentlich geringerer Drift behaftet ist, als z.B. standardmäßig

eingesetzte Radumdrehungszähler [Böhringer 2008]. Zum anderen ist der Sensor in der Lage, im Fahrweg befindliche Weichen und Weichenbauteile zu erkennen, sodass eine absolute Positionsbestimmung möglich ist. Zusätzliche Installationen an der Strecke, wie z.B. Balisen sind nicht erforderlich, da der Sensor zur Geschwindigkeitsmessung und zur Klassifikation der bereits vorhandenen Bauteile am Gleis verwendet werden kann [Geistler 2006; Engelberg 2001].

### 3.2.4 Induktive Sensoren

Bei einem Radsensor mit einer induktiven Drehzahlerfassung rotiert ein Zahnrad, welches aus einem ferromagnetischen Material besteht, an einer Spule, die um einen Permanentmagneten gewickelt ist. Abhängig davon, ob ein Zahn oder eine Lücke des Zahnrades gegenüber dem Spulenkern steht, verändert sich der magnetische Fluss durch die Spule [Juckenack 1989].

Die Änderung des magnetischen Flusses induziert eine Spannung, die proportional zur Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses ist. Für diese Art der Messung benötigt man keine Stromversorgung, es sind somit passive Sensoren, die dadurch auch einfach, robust und auch kostengünstig sind. Einer der großen Nachteile dieser Sensoren ist ihre frequenzabhängige Signalamplitude, sie liefern somit bei kleinen Geschwindigkeiten keine ausreichend guten Ergebnisse. Außerdem müssen diese Sensoren gut befestigt und genau ausgerichtet werden [Juckenack 1989].

### 3.2.5 Hallsensoren

Hallsensoren sind aktive Sensoren und benötigen damit eine externe Stromquelle. Sie sind statische Magnetfeldsensoren, die gegenüber dem induktiven Übersprechen unempfindlich sind und ein frequenzunabhängiges Signal liefern vgl. [Czommer 2000]. Sie eignen sich für kleine Geschwindigkeiten, da sie bis zu einer Frequenz von 0 Hz messen können. Gefahr besteht durch andere starke magnetische Quellen, die in der Nähe der Sensoren sind, welche die Messunsicherheit beeinflussen können [Juckenack 1989].

Wie bei den anderen magnetischen Sensoren bedarf es bei der Installation der Hallsensoren einer sorgfältigen Ausrichtung und Montage.

### 3.2.6 Vergleich ausgewählter fahrzeugseitiger Sensoren

Folgende Tabelle bietet einen Überblick über einige ausgewählte fahrzeugsseitige Komponenten bezüglich ihrer Merkmale. Aus vielerlei Gründen ist es nicht möglich, einen vollständigen und komplexen Vergleich und Darstellung zu realisieren. Eine detaillierte Auseinandersetzung ist in [Klinge 1998; Pachl 1999; Deuta 2005; Kaplan, Hegarty 2006; Kaplan 1996; Seeber, Schmitz 2007] zu finden.

**Tabelle 3-1 Vergleich von ausgewählten fahrzeugsseitigen Sensoren (Stand 07/2008)**

Merkmale	Radar	Radimpulsgeber	Wirbelstromsensor	GNSS-Empfänger
Ausfallrate	k. A.	$2,5 \cdot 10^{-6} / \text{h}$	k. A.	k. A.
Geschwindigkeitsbereich	3 – 250 km/h	0 – 550 km/h	0 – 292 km/h	0 – x T km/h
Kosten	ca. 4000 €	ca. 2500 €	ca. 5000 €	ca. 1250 €

### **3.3    *Infrastrukturseitige Sensoren***

Der Bereich der infrastrukturseitigen Sensorik umspannt ein sehr weites Feld sowohl von Messsensoren als auch -verfahren. In folgenden Abschnitten werden nur einige Sensorensysteme vorgestellt und deren Messprinzipien erläutert [Wald 1998].

#### **3.3.1    Induktionsschleifen und Achszähler im Schienenverkehr**

Im Schienenverkehr werden Induktionsschleifen als Sensoren benutzt. Es werden im Gleisbett räumlich lange Schleifen verlegt, die in festen Abständen ihre Seiten an definierten Stellen kreuzen, die gleichzeitig streckenseitig Induktionsveränderungen zur Positionserfassung und fahrzeugseitig durch Detektion der Kreuzungsstellen der Wegmessung dienen [Schnieder 2007].

#### **3.3.2    Achszähler**

Das Prinzip, durch Induktivitätsveränderung die Gleisabschnittsbesetzung zu detektieren, wird beim so genannten Achszähler ebenfalls verwendet. Die Annäherung und Überfahrt eines metallischen Rades auf der Achse eines Schienenfahrzeuges wirkt auf unmittelbar am Gleis montierte Induktionsspulen derart, dass ein damit verbundener Schwingkreis verstimmt wird. Dessen Sensierung liefert Impulse, die zur Zählung aufeinanderfolgender in den Gleisabschnitt einfahrender Radachsen genutzt werden. Ein gleichartiger Sensor am Ende des Gleisabschnitts detektiert die Folge der ausfahrenden Achsen. Diese Anordnung wird ebenfalls zur so genannten Besetzt- bzw. Freimeldung verwendet und kann zur wichtigen Zugvollständigkeitsprüfung verwendet werden. Ein Sensor enthält dicht nebeneinander zwei Spulen zur Erkennung der Fahrtrichtung [Pachl 1999; Schnieder 2007].

#### **3.3.3    Gleisstromkreis**

Ein Gleisstromkreis ist ein Sensor im Bereich des spurgeführten Verkehrs zur Erkennung, ob ein Gleisabschnitt von einem Zug (mit mindestens eine Achse) belegt ist [Pachl 1999].

Es werden beide Schienen des Gleises gegeneinander elektrisch isoliert. An einer Seite (Speiseseite) wird eine Spannungsquelle mit integrierter Strombegrenzung angeschlossen, am anderen Ende (Relaisseite) wird von der angelegten Spannung ein Relais angesteuert. Befährt nun ein Zug den Gleisstromkreis, so schließen die Achsen die Spannungsquelle kurz. Durch die vorhandene Strombegrenzung fällt die Spannung zwischen den beiden Schienen ab, sodass das Relais abfällt und das Vorhandensein eines Zuges signalisiert. Wenn alle Achsen des Zuges den Gleisabschnitt verlassen haben, ist der Kurzschluss entfernt und das Relais zieht wieder an. Hiermit wird das Gleis wieder als frei erkannt [Pachl 1999; Schnieder 2007].

#### **3.3.4    Lichtschranke**

Bei einer Lichtschranke wird mit Hilfe eines Lichtstrahls ein Steuerungsimpuls ausgelöst. Man unterscheidet zwischen zwei Arten der Lichtschranke: einer Reflexions- und einer Einweglichtschranke.

Bei den Reflexionslichtschranken wird das Licht von einer Reflexionsfolie, einem Spiegel oder einem Reflektor an das Gerät zurückgeworfen. Es wird also nur ein elektronisches Bauteil benötigt. Das bedeutet, dass sowohl der Sender als auch der Empfänger in einem Gerät vereinigt sind

Alle Reflexionslichtschranken erfassen nur die Objekte, die das Licht auch zurückreflektieren können. Durch die verschiedenen Reflexionshintergründe wie auch unterschiedliche Anordnung der Reflektoren ist es möglich eine begrenzte Information zu übertragen.

Die Einweglichtschranke besteht aus zwei separaten Teilen: dem Lichtsender und dem Lichtempfänger. Diese Art der Lichtschranke muss infrastrukturseitig eingebaut werden und erfasst hierdurch all jene Objekte auf der Strecke, die den Lichtstrahl unterbrechen [Lux 2006].

### **3.4 Kombinierte Sensorsysteme zur Ortung**

Kombinierte Sensorsysteme werden zur Ermittlung verkehrlicher Messgrößen benötigt, die von einem Sensor allein prinzipiell nicht oder nur in unzureichender Auflösung, Unsicherheit (statisch, dynamisch) oder unzureichender Verlässlichkeit (Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit) geliefert werden können.

#### **3.4.1 Punktförmige Zugbeeinflussungssysteme**

Bei der Punktförmigen Zugbeeinflussung handelt es sich um eine Familie von Systemen, denen gemeinsam ist, dass sie im Bereich der Schienenfahrzeuge an diskreten Punkten des Gleises Informationen (normalerweise über den Zustand von Signalen, Halt oder Fahrt) auf das Fahrzeug übertragen können [Pachl 1999; Schnieder 2007].

##### **3.4.1.1 Krokodil**

Beim sogenannten *Krokodil*, das vornehmlich bei der französischen Eisenbahn (SNCF) eingesetzt wird, verfügen die Fahrzeuge über Schleifkontakte, mit denen entsprechende Kontaktflächen auf dem Gleis abgetastet werden. Diese Kontaktflächen werden von der Stellung der Signale beeinflusst und so die von ihnen angezeigte Information in elektrischer Form dem Fahrzeug bereitgestellt. Hierbei kommt es zum einen zu einer galvanischen Kopplung von Signal und Fahrzeug, zum anderen besteht bei diesen offen liegenden Kontakten immer die Gefahr der Verschmutzung und Abnutzung [Pachl 1999; Schnieder 2007].

##### **3.4.1.2 Induktive Zugsicherung**

Eine berührungslose Form der punktförmigen Zugbeeinflussung bietet die *Induktive Zugsicherung* (kurz *Indusi*). Hierbei verfügt das Fahrzeug über einen aktiv gespeisten elektrischen Schwingkreis, der auf eine bestimmte Frequenz abgestimmt ist. An der Strecke befindet sich ein passiver Schwingkreis, der in Abhängigkeit von der Signalstellung kurzgeschlossen werden kann. Kommt nun der aktive Schwingkreis des Fahrzeugs in die Nähe des streckenseitigen Schwingkreises (in nicht kurzgeschlossenem Zustand), so gerät dieser in Resonanz. Dieser Resonanzeffekt kann an einer Änderung des Stroms auf der Fahrzeugseite erkannt werden.

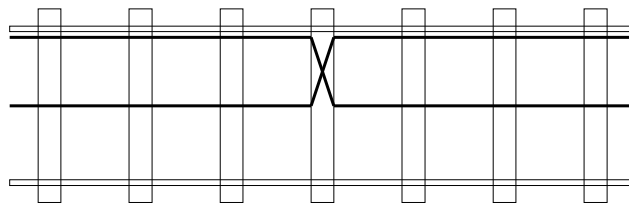
Bei den in Benutzung befindlichen Indusi-Systemen werden üblicherweise drei fahrzeugseiti-



ge Schwingkreise, abgestimmt auf verschiedene Frequenzen (500 Hz, 1KHz, 2KHz) verwendet. Diese Schwingkreise sind in einem einzigen Gerät, dem so genannten *Fahrzeugmagneten*, zusammengefasst. Der streckenseitige Schwingkreis wird auch als *Gleismagnet* bezeichnet [Walter 1998; Hümmer 1998].

### 3.4.2 Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB)

Ein ortskontinuierlicher Datentransfer in das Fahrzeug ist im Schienenverkehr mit der *linienförmigen Zugbeeinflussung (LZB)* möglich [Pachl 1999]. Hierbei ist ein linienförmiger Leiter (oder Antenne) entlang der Strecke verlegt. Diese Antenne besteht aus zwei elektrischen Leitern, die in Form von zwei Kabeln zwischen den Schienen realisiert ist. Eines der Kabel ist in der Mitte zwischen den Schienen verlegt, das andere direkt neben einer Schiene. An bestimmten Punkten werden die beiden Leiter gekreuzt, sodass derjenige, der vorher an der Schiene lag, danach in der Mitte liegt und der andere umgekehrt. Diese Überkreuzung kann ebenfalls vom Fahrzeug erkannt und als Ortungsinformation umgesetzt werden (siehe Abbildung 3-4).



**Abbildung 3-4 Leitungsführung bei LZB**

Der Vorteil der linienförmigen Zugbeeinflussung liegt darin, dass das Fahrzeug in die Lage versetzt wird Informationen nicht nur punktuell (siehe Abschnitt 3.4.1) aufzunehmen sondern kontinuierlich. Dies führt dazu, dass der Datenstrom von wenigen Bit bei punktueller Informationsaufnahme wesentlich gesteigert werden kann [Kirczi 1996].

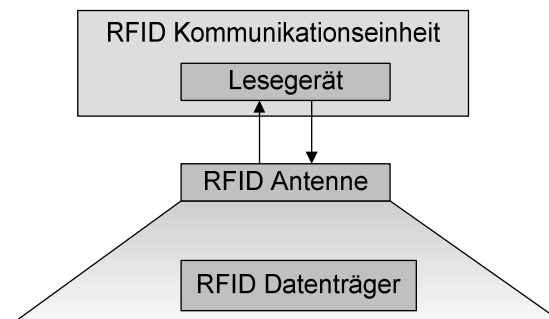
### 3.4.3 Transponder basierte Systeme

Dieser Abschnitt befasst sich mit RFID (Radio Frequency Identification) Transpondern. Es wird auf die unterschiedlichen Systeme, deren Einsatzgebiet und deren Eigenschaften eingegangen. Ein Transponder ist ein – meist drahtloses – Kommunikations-, Anzeige- oder Kontrollgerät, welcher eingehende Signale aufnimmt und automatisch beantwortet.

#### 3.4.3.1 RFID System

Es sind momentan unzählige RFID Systeme von ebenso vielen Herstellern auf dem Markt verfügbar, deren technische Parameter für unterschiedlichste Anwendungsgebiete optimiert sind. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel eine generische Struktur von einem RFID basiertem System vorgestellt. Ein RFID System besteht immer aus zwei Komponenten (siehe Abbildung 3-5) [Poliak, Hänsel 2007]:

- einem RFID Datenträger (Transponder), der die relevanten Daten beinhaltet und
- dem RFID Kommunikationseinheit, das je nach Ausführung als Lese- oder Schreib/Leseinheit dient.



**Abbildung 3-5 Darstellung des RFID Systems [Poliak, Hänsel 2007]**

Der Transponder, der den eigentlichen Datenträger des RFID Systems darstellt, ist außerhalb des räumlichen Ansprechbereichs eines Lesegerätes meistens vollkommen passiv. Erst innerhalb des Empfangsbereiches eines Lesegerätes wird der Transponder aktiv und kann erst dann seine Daten senden. Nur in diesem Bereich ist es überhaupt möglich, eine Kommunikation zwischen dem Lesegerät und dem Datenträger zu gewährleisten. Die Übertragung der Daten erfolgt vom Datenträger zur Leseeinheit vollkommen kontaktlos [Finkenzeller 2005]. Die für die Übertragung notwendige Energie liefert eine im Transponder integrierte Stromquelle (z.B. Batterie).

Das Lesegerät besteht in der Regel aus einem Hochfrequenzmodul (Sender und Empfänger), einer Kontrolleinheit und einem Koppellement zum Transponder. Darüber hinaus besitzen die meisten Lesegeräte zusätzliche Schnittstellen, um die erhaltenen Daten an ein anderes System wie z.B. einen Rechner weiterzuleiten [Finkenzeller 2005].

Ein sehr wichtiges Merkmal von RFID Systemen ist die Energieversorgung der Datenträger. Man unterscheidet zwischen passiven, aktiven und semiaktiven Transpondern. Während die passiven Transponder keinerlei eigene Energieversorgung besitzen und daher ihre ganze für den Betrieb benötigte Energie aus dem elektrisch/magnetischen Feld des Lesegerätes entnehmen, enthalten die aktiven Transponder eine zusätzliche Energieversorgung, z.B. eine Batterie, die den Transponder entweder ganz oder nur teilweise mit der Energie versorgt. Semi-Aktive Transponder sind eine Sonderklasse von Transpondern und ordnen sich bezüglich ihrer Funktionalität zwischen den aktiven und passiven Transponder ein und nutzen beide Energieversorgungsmechanismen. [Schnieder 2007]. Die Reichweite der unterschiedlichen RFID Systeme ist auch ein wichtiges Merkmal, um die RFID Systeme zu unterscheiden. Man unterscheidet zwischen *close-coupling* (< 1 cm), *remote-coupling* (bis 1 m) *long-range* (> 1 m) Systemen [Finkenzeller 2005].

Die Sendefrequenz der RFID-Systeme teilt man generell in drei Bereiche: LF (Low Frequency) mit 30 bis 300 kHz, HF (High Frequency) bzw. RF (Radio Frequency) mit 3 bis 30 MHz, UHF (Ultra High Frequency) bzw. Mikrowelle mit über 3 GHz [Poliak, Hänsel 2007; Finkenzeller 2005].

### 3.4.3.2 Eurobalise

Um unterschiedliche europäische Zugsicherungssysteme zu vereinheitlichen und damit auch den grenzübergreifenden Zugverkehr zu erleichtern, wurde von der Europäischen Union die Schaffung eines (einheitlichen) europäischen Zugsicherungs- und Zugsteuerungssystem ETCS beschlossen. Einer der Bestandteile von ETCS ist die Eurobalise, welche zur punktförmigen Übertragung von Daten dient. Je nach Ausführung werden mit der Eurobalise

ortsabhängige Daten (Ortsmarken, Neigungs- und Geschwindigkeitsprofile usw.) oder signalabhängige Daten von der Strecke auf den Zug übertragen. Es handelt sich dabei um ein induktiv gekoppeltes RFID-System mit unharmonischer Rückfrequenz. Die Eurobalise (siehe Abbildung 3-6) gehört durch ihre Reichweite und den Sendebereich zu den Remote-coupling-RFID-Systemen. Die Energieversorgung geschieht wie bei allen passiven RFID-Systemen kontaktlos während der Überfahrt des Zuges durch das Lesegerät, welches am Zug angebracht ist, mittels induktiver Kopplung. Die Energieversorgung erfolgt auf einer Frequenz von 27,115 MHz, während die eigentliche Datenübertragung von der Balise zum Zug auf einer Frequenz von 4,24 MHz stattfindet. Dabei ist die Kommunikation so ausgelegt, dass die Datentelegramme auch bei einer Geschwindigkeit von bis zu 500 km/h noch sicher ausgelesen werden können [Siemens 2005b; Poliak, Hänsel 2007].



**Abbildung 3-6 Eurobalise –Typ 1 [Siemens 2005a]**

Mit dieser Technologie ist es möglich, berührungsfrei und damit auch verschleißfrei Informationen zu übertragen.

### **3.5 Zusammenfassung**

Sensoren im Bereich der Fahrzeuge und Verkehrswege finden immer weitere Anwendungsgebiete um den Verkehrsfluss, die Verkehrsauslastung und Verkehrs- bzw. Fahrzeugzustände besser zu erkennen, zu lenken und für Assistenzsysteme zu nutzen. Hierfür stehen viele Arten von Sensoren zur Verfügung, die sowohl fahrzeugseitig als auch streckenseitig einsetzbar sind. Man unterscheidet Wellenausbreitungssensoren, elektromagnetische Sensoren die sowohl fahrzeugseitig als auch streckenseitig zur Anwendung kommen, aber auch rein fahrwegsseitige Sensoren. Bei der Auswahl der Sensoren ist darauf zu achten, dass ein Sensor die von der Umwelt zur Verfügung gestellten Daten abbilden kann (Geschwindigkeitsmessung mit Doppler Radar oder Wirbelstromsensor) [Schnieder 2007].

Um Sensoren richtig einzusetzen, ist es im Vorfeld wichtig, die Anforderungen der zu erfassenden Größen zu ermitteln, d.h. welche Umwelanforderungen werden gestellt, welches Verkehrsmittel soll ausgestattet werden, welche verkehrsseitige Infrastruktur ist vorhanden und welche Messunsicherheit wird gefordert.

Für diese so unterschiedlichen Anforderungen gibt es individuelle Lösungen, wie z.B. im Bereich der Bahn mit der linienförmigen Zugbeeinflussung und den transponderbasierten Systemen zu sehen ist.

Es wurde verdeutlicht, dass ein Sensor unterschiedliche Eigenschaften erfüllen muss, um seiner ganz speziellen Aufgabe gerecht zu werden. Hierfür werden gängige Prinzipien der Physik bemüht (z.B. Dopplereffekt, Laufzeitmessung).

Zu bemerken ist noch, dass das Ziel dieses Kapitels eine Klassifikation von Sensoren sowie

die Messprinzipien zu beschreiben, um dem Leser ein grundsätzliches Gefühl zu vermitteln, wie man sich in dieser Plejade der Sensoren, Messprinzipien und -verfahren orientieren kann, und sich nicht einer vollständigen Auflistung aller Sensoren und deren Messverfahren gegenüber sieht.

# 4 Satelliten basierte Ortungssysteme zur Positionsbestimmung

Das GNSS (Global Navigation Satellite System) ist heutzutage für die Ortung im Verkehrsbereich nicht mehr wegzudenken, da bereits viele Anwendungen darauf aufbauen und darauf angewiesen sind, beispielsweise Navigationssysteme im Straßenverkehr oder Fahrgastinformationssysteme im gesamten Bereich des ÖPNV. GNSS ist dabei die allgemeine Bezeichnung für Navigationssysteme – genauer Ortungssysteme – welche die satellitenbasierte Positionsbestimmung benutzen. Es gibt zurzeit zwei verbreitete Systeme für die Satellitennavigation im Europa, nämlich das amerikanische GPS (Global Positioning System) und das russische GLONASS. Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO befindet sich noch im Aufbau. In diesem Kapitel werden diese drei Satellitennavigationssysteme beschrieben. Dabei wird der Schwerpunkt auf das GALILEO-System gelegt.

In den folgenden Abschnitten wird zum besseren Verständnis ein größerer Detaillierungsgrad von Beschreibungen der einzelnen Systeme und Messverfahren gewählt.

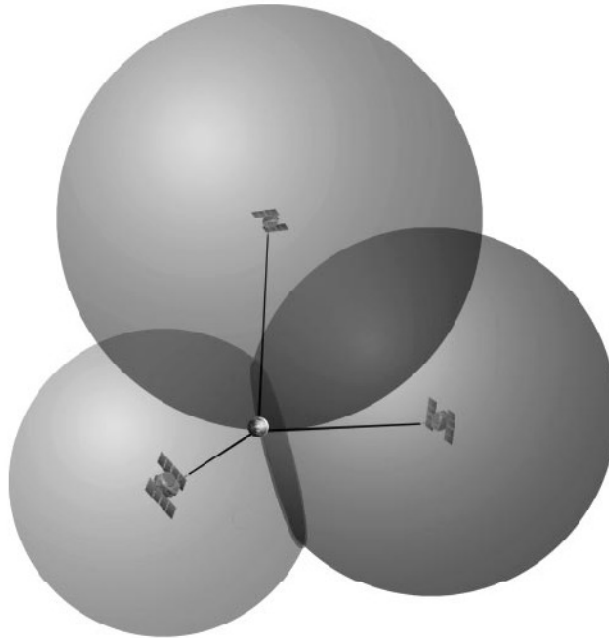
## 4.1 *Positionsbestimmung mit Satellitensystemen*

Eine Position im Raum lässt sich durch drei unabhängige Entfernungsangaben bezüglich ihrer Referenzposition genau festlegen, d. h. mit drei linear unabhängigen Gleichungen in den drei Unbekannten einer 3-D-Position kann die Position exakt bestimmt werden. Um die Gleichungen aufstellen zu können, werden drei geometrische Angaben über die zu ermittelnde Position benötigt [Mansfeld 1998; Zogg 2006a].

Eine mögliche Lösung stellt die Entfernungsmessung zu drei sichtbaren Referenzpunkten im Raum dar. Das Kriterium der Sichtbarkeit führt zur Idee, im Orbit auf definierten Bahnen bewegten Satelliten als Referenzpunkte zu verwenden, da Satelliten aufgrund ihrer Flughöhe vom Boden aus großflächig sichtbar sind (Abbildung 4-1). Entfernungen werden über die Laufzeit eines vom Satelliten zum Empfänger abgestrahlten Signals ermittelt, da sich der zurückgelegte Weg aus der Laufzeit und der Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals ermitteln lässt. Dieser berechnete Abstand wird Pseudoabstand oder Pseudoentfernung genannt, da dieser noch mit zahlreichen Fehlern behaftet ist [Klinge 1998; Mansfeld 2006; ESA 2002b].

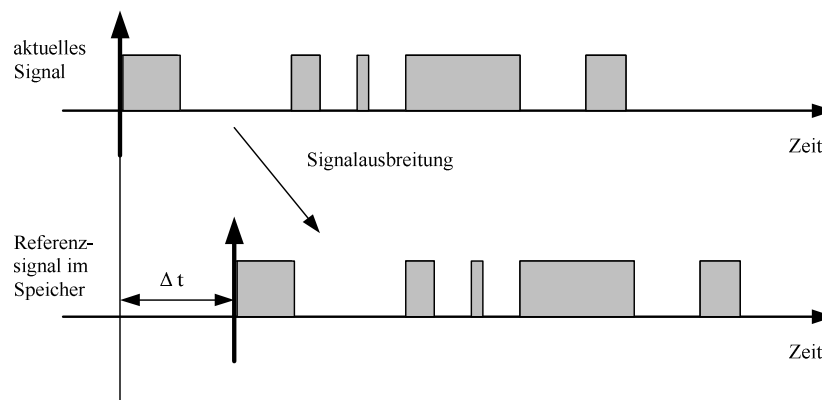
Um die Laufzeit der Signale zu ermitteln, wird im Sender und Empfänger zum gleichen Zeitpunkt das sogenannte Pseudo-Random-Noise-Code (PRN-Code) –Signal erzeugt. Dazu werden alle vom Satelliten abgestrahlten Signale im Empfänger in einem Referenzspeicher abgelegt. Im Empfänger wird das Signal dann so lange auf der Zeitachse verschoben ( $\Delta t$ , in Abbildung 4-2), bis es mit dem vom Satelliten empfangenen Signal in Deckung gebracht ist.

---



**Abbildung 4-1 Signal-Laufzeiten von drei Satelliten zur Positionsbestimmung im Raum [Evers, Kasties 2005]**

Die zeitliche Verschiebung entspricht der Laufzeit  $\Delta t$  und ist im Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion des empfangenen Signals (siehe auch Abschnitt 2.6.4) mit dem im Empfänger erzeugten Signal zu finden [Klinge 1998; Mansfeld 2006; Schnieder 2007].



**Abbildung 4-2 Prinzip der Abstandmessung mit PRN-Code nach [Klinge 1998]**

Um diese im ns-Bereich liegende Zeit messen zu können, muss in Sender und Empfänger ein Zeitnormal installiert sein, damit die Signale zunächst auf Nanosekunde genau synchron erzeugt werden. Das würde aber bedeuten, dass jeder Empfänger eine hochgenaue Uhr besitzen müsste. Solche Empfänger wären außerdem vergleichsweise groß und teuer. Deshalb wird die Zeit neben den drei Unbekannten der Position als vierte Unbekannte eingeführt. Für eine Positionsbestimmung werden somit mindestens vier Satelliten benötigt. Um festzustellen, ob ein Satellit ein fehlerhaftes Signal liefert, wird ein fünfter Satellit benötigt. Um einen fehlerhaften Satelliten zu erkennen und damit aus der Rechnung eliminieren zu können, ist ein sechster Satellit erforderlich (RAIM Verfahren). Diese Zusammenhänge ähneln denen in der Datenübertragung, bei der Prüfbits verwendet werden, um fehlerhafte Bits zu erkennen und gegebenenfalls zu korrigieren [Klinge 1998; Mansfeld 1998; Schnieder 2007].

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Satellitensignals in der Ionosphäre und Troposphäre ist geringer als im Weltraum [Zogg 2006a]. Dieser Effekt ist bei Satelliten niedriger Elevation über dem Horizont aufgrund der längeren Wege durch diese Schichten stärker als bei Satelliten großer Elevation. Signale unterschiedlicher Frequenz haben in der Ionosphäre verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Deshalb lässt sich durch die unterschiedlichen Ankunftszeitpunkte der auf die Trägerfrequenzen aufmodulierten PRN-Codes dieser Fehler ermitteln und weitgehend eliminieren (siehe Abschnitt 4.8.4) [Grewal et al. 2001; Hein, Pany 2002; Käs, Pauli 1991].

## **4.2 Global Positioning System (GPS)**

Das Global Positioning System GPS verwendet eine Konstellation von mindestens 24 Satelliten, dabei werden 21 benötigt und 3 sind aktiver Ersatz. Das System ermöglicht einem GPS-Empfänger seine Position, seine Geschwindigkeit und seine Richtung festzustellen. Das GPS wurde durch das Verteidigungsministerium der Vereinigten Staaten von Amerika entwickelt. Dieses System wird offiziell NAVigational Satellite Timing and Ranging-GPS (NAVSTAR-GPS) bezeichnet. Manchmal wird NAVSTAR auch als Abkürzung für NAVigation System Using Timing and Ranging genutzt. GPS war ursprünglich nur zur Navigation und Positionsbestimmung im militärischen Bereich (in Waffensystemen, Kriegsschiffen, Flugzeugen usw.) vorgesehen gewesen. Heutzutage wird es aber auch für zivile Zwecke benutzt [Martin 2008].

### **4.2.1 Segmente des GPS**

Das GPS teilt sich in drei Segmente: das Raumsegment (Space Segment), das Nutzersegment (User Segment) und das Kontrollsegment (Ground Segment). Siehe auch Abbildung 4-6.

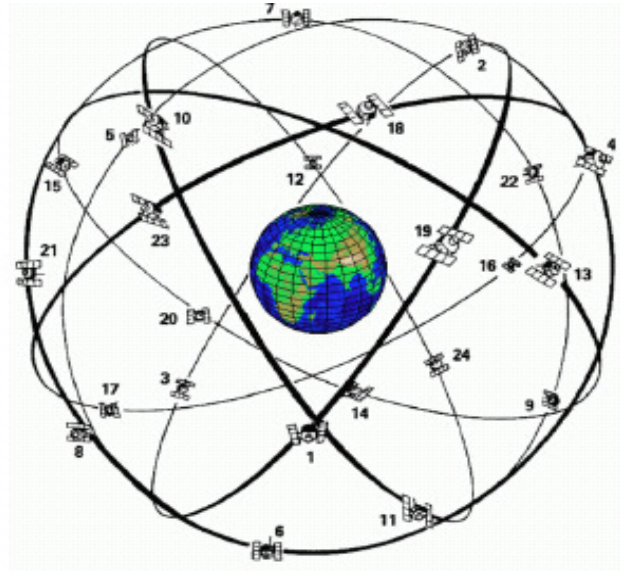
#### **4.2.1.1 Raumsegment**

Das Segment beinhaltet die Konstellation der Satelliten und die Satelliten selbst. Das Raumsegment besteht mindestens aus 24 Satelliten. Der erste der Satelliten wurde bereits vor 30 Jahren in seine Umlaufbahn gebracht. Mit den Jahren wurden die Satelliten immer weiter entwickelt. Heutzutage gibt es mittlerweile fünf unterschiedliche Arten von Satelliten (Block I, Block II, Block IIA, Block IIR und Block IIF). Die Hauptunterschiede zwischen Block I und Block II sind die Lebensdauer der Satelliten und das Gewicht. Der erste Block hatte eine viel geringere Lebensdauer als der zweite Block [Kowoma 2007; Antova 2006].

Zwischen 1978 und 1985 wurden von Kalifornien aus elf Block-I Satelliten mit jeweils einer Masse von 845 kg gestartet, von denen heute jedoch kein einziger mehr in Betrieb ist. Diese Satelliten waren für eine Lebensdauer von 4,5 Jahren konzipiert, überlebten jedoch ihr geplantes Alter um weitere fünf Jahre. Die Block-II Satelliten (Klassen A, F, R und M) wiegen mit über 1500 kg etwa das Doppelte der Block-I Satelliten. Der erste dieser Satelliten wurde 1989 von Cape Canaveral aus gestartet. Diese Satelliten haben eine "Spannweite" von ca. 5,1 m. Die Block-II Satelliten sind für eine Betriebsdauer von mindestens 7,5 Jahren ausgelegt [Kowoma 2007; Martin 2008].

Die nächste Generation der Satelliten (GPS Block III) soll voraussichtlich über eine weitere Frequenz für die zivile Nutzung verfügen, die dann Positionsbestimmungen mit noch größerer Genauigkeit ermöglicht. Der erste Satellit wird schon in Herbst 2008 im Orbit eingesetzt. Hier spricht man immer lauter, dass die dritte Generation von GPS von der technischen Perfor-

mance des in heutigen Zeiten entwickelten GALILEO Systems in vielen Aspekten überschritten wird und dem Zivilnutzer die Garantie seiner Dienste gewährleistet werden kann. In der Zeit der Entstehung dieser Arbeit sind keine offiziellen Dokumente zu dieser Problematik veröffentlicht worden, aber Fachgespräche mit Entwicklern und Betreibern von GPS deuten darauf hin, dass die aktuelle Entwicklung zum halbzivilen GPS geht [Martin 2008].



**Abbildung 4-3 GPS-Konstellation [Kowoma 2007]**

Die Satelliten bewegen sich gruppenweise auf Bahnen, deren Ebenen gegenüber der Äquatorebene eine bestimmte Neigung haben [Misra, Enge 2001; Kaplan, Hegarty 2006].

### 4.2.1.2 Kontrollsegment

Das Kontrollsegment besteht aus fünf Basisstationen, der Hauptstation in Colorado Springs und den Monitor- und Bodenkontrollstationen auf Hawaii, Ascension Island (Atlantik), Diego Garcia (Indischer Ozean) und Kwajalein (Pazifik). Zu ihren Aufgaben gehören die Vorausberechnung der Satellitenbahnen, die Überwachung der Satellitenuhren und die Übermittlung der Navigationsnachrichten an die Satelliten [Kaplan, Hegarty 2006].

Da die Systeme eine sehr genaue Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitbestimmung ermöglichen sollen, muss eine ständige Überprüfung und Korrektur der Satellitenbahn, -position und -zeit, sowie anderer in der Navigationsnachricht enthaltener Parameter gewährleistet sein. Dies wird über das Bodenkontrollsegment realisiert. Die Bodensegmente bestehen aus Beobachtungs- und Verbindungsstationen, sowie aus Kontrollzentren [Kaplan, Hegarty 2006].

Das GPS Kontrollsegment (Operational Control System OCS) besteht aus folgenden Elementen:

- Die Master Control Station (Hauptkontrollstation) befindet sich in Colorado Springs. Dieser Station obliegt die Kontrolle des Systembetriebs und der GPS-Systemzeit. Hierfür werden die Daten der Beobachtungsstationen gesammelt und daraus die voraussichtlichen Orbits (Broadcast Ephemeriden) und Uhrparameter der Satelliten berechnet, die über die Bodenkontrollstationen zu den Satelliten gesendet werden [Mans-



feld 1998].

- **Monitor Stations (Beobachtungsstationen):** Es existieren fünf Beobachtungsstationen in Hawaii, Colorado Springs, Ascension Island, Diego Garcia und Kwajalein. Jede dieser Stationen ist mit einer hochpräzisen Cäsium-Frequenznormaluhr und mehreren GPS-Empfängern ausgestattet, die kontinuierlich die Pseudoentfernungen zu allen sichtbaren Satelliten im 1.5 Sekundentakt messen. Diese Daten werden mit Hilfe von ionosphärischen und meteorologischen Daten geglättet und im 15-Minuten-Intervall zur Hauptkontrollstation gesendet [Mansfeld 1998].
- **Ground Control Stations (Bodenkontrollstationen):** Die drei Bodenkontrollstationen in Ascension, Diego Garcia und Kwajalein sind die Kommunikationsschnittstelle zu den Satelliten. Sie bestehen hauptsächlich aus den Sendeantennen, mit denen die Broadcast Ephemeriden und Uhrparameter einmal täglich über das S-Band zu den Satelliten gesendet werden. Unabhängig von einem eventuellen Ausfall der Bodenkontrollstationen können die Satelliten noch für ca. 180 Tage die Positionierung mit GPS ermöglichen [Mansfeld 1998].

#### 4.2.1.3 Nutzersegment

Das Nutzersegment besteht aus den Nutzern, die wissen möchten, wo sie sind, waren oder wie sie ihr Ziel erreichen. Es setzt sich aus einer großen Anzahl von mit GPS-Empfängern ausgestatteten Institutionen und Personen zusammen. Das Nutzersegment kann nach vielen Arten gegliedert werden [Kaplan 1996; Kaplan, Hegarty 2006].

### 4.2.2 Dienste von GPS

GPS bietet zwei Arten von Diensten an:

- **Precise Positioning Service (PPS):** PPS schließt eine Eigenschaft ein, das sogenannte Anti-Spoofing (AS), welches nur von den DoD-autorisierten Benutzern erreicht werden kann, die mit passenden kryptographischen Schlüsseln ausgerüstet sind.
- **Standard Positioning Service (SPS)** [Misra, Enge 2001]. Zivile Nutzer weltweit verwenden die SPS ohne Beschränkungen. Die meisten Empfänger sind zum Empfangen und zum Verwenden des SPS Signals fähig. Die SPS Genauigkeit wird absichtlich vom DoD durch den Gebrauch von Selective Availability (SA) vermindert [Dana 2007].

Die GPS Genauigkeitsabbildungen entstehen aus dem Bundes-Radionavigations Plan von 1999. Die Abbildungen haben 95% Genauigkeit und drücken den Wert von zwei Standardabweichungen der Radialstörung von der tatsächlichen Antennenposition zu einem Ensemble von Positionsschätzungen, die unter einem spezifizierten Satellitenhöhenwinkel (fünf Grad) und dem PDOP-Wert, welcher bis 6 betragen kann, aus [Kaplan, Hegarty 2006; Misra, Enge 2001].

Für die horizontale Genauigkeit ist 95% das Äquivalent von 2drms (two-distance root-mean-squared) oder zweimal die Radialstörung Standardabweichung. Für Vertikale- und Zeitstörungen ist 95% der Wert von Zwei-Standardabweichungen der vertikalen Störung oder der Zeitstörung. Empfängerhersteller können andere Genauigkeitsmaße verwenden:

- **Root-mean-squared Störung** ist der Wert von einer Standardabweichung (68%) der

Störung in einen, zwei oder drei Maßen.

- Circular Error Probable (CEP) ist der Wert des Radius eines Kreises, zentriert in der tatsächlichen Position, die 50% der Positionsschätzungen enthält.
- Spherical Error Probable (SEP) ist das kugelförmige äquivalent von CEP, welcher der Radius eines Bereichs ist, zentriert in der tatsächlichen Position, die 50% der drei Maßpositionsschätzungen enthält [Kaplan, Hegarty 2006].

### 4.2.3 GPS Satellitensignale

Die Signale, die jeder GPS Satellit überträgt, können in zwei Kategorien geteilt werden. Die Ranging Signale und die Navigationsmitteilungen. Das Ranging Signal wird benutzt, um den Abstand zum Satellit zu messen. Der GPS Satellit überträgt ununterbrochen eine Navigationsmitteilung bei 50 bps. Diese Navigationsmitteilung enthält die Zeit, die Almanach- und die Ephemeriden- Daten. Die sogenannten Almanach-Daten beinhalten in vereinfachter Form Informationen über die Bahnparameter aller Satelliten, deren technischen Zustand und ihre momentane Konfiguration, Identifikationsnummer usw. Die Übertragung von Almanachdaten dauert ungefähr 12,5 Minuten (siehe Abschnitt 4.7). Die Ephemeriden teilen den momentanen Satellitenpositionen mit, woher sie die Datennachricht übermittelt bekommen. Sie bestehen aus einer Liste der genauen Positionen eines Himmelskörpers als eine Funktion der Zeit. Die Daten können in Echtzeit als "übertragene Ephemeriden" (Broadcast Ephemeride) oder nachberechnet als "präzise Ephemeriden" (Precise Ephemeride) vorliegen [Kaplan, Hegarty 2006].

## 4.3 GLONASS

Das System GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Spoutnikovaya Sistema) ist das russische Äquivalent des amerikanischen GPS. Die Zahl der Gemeinsamkeiten mit dem GPS ist weitaus größer als die der Unterschiede.

Die Konstellation des GLONASS war nur während eines kurzen Zeitraums vollständig. Im Jahr 2008 gab es nur ca. 75 % Satelliten, die funktionsfähig waren [Revnivykh 2008; Langley 1997].

Das System GLONASS wird jedoch immer noch gepflegt und Russland stellt weiterhin die Funktionsfähigkeit durch neue Satelliten sicher. Aufgrund des Experiments IGEX - 98 (International GLONASS Experiment), initiiert im September 1997 im Auftrag der IGS (International GPS Service), ist es heute möglich Messungen des GPS mit denen von GLONASS zu kombinieren [Langley 1997].

Viele GNSS-Empfänger sind auch fähig, Signale gleichzeitig aus GPS- und GLONASS-Satelliten zu empfangen, wodurch die Anzahl der Satelliten steigt und gleichzeitig die Qualität der Ortung sich verbessert. Diese Steigerung der Anzahl der Satelliten ist sehr nützlich, weil sie die Fehler bei der Positionsbestimmung verringert und das System dadurch eine bessere Zuverlässigkeit bekommt [Roßbach 2000].

### 4.3.1 GLONASS Systembeschreibung

Wie das amerikanische GPS, so besteht das russische GLONASS-System auch aus drei Segmenten: einem Raumsegment, einem Kontrollsegment und einem Nutzersegment [Antova 2006].

Die vollständige GLONASS-Konstellation entspricht der des Raumsegments und umfasst 24 Satelliten in einer Höhe von 19000 km (siehe Abbildung 4-4). Diese 24 Satelliten sind auf 3 Umlaufbahnen verteilt [FSA 2004]. Die Bahnneigung beträgt  $64,8^\circ$  gegen den Äquator mit einem Abstand der Bahnebenen in der Äquatorebene von  $120^\circ$  gegeneinander. Die Umlaufzeit eines Satelliten im GLONASS-System beträgt 11 Stunden 15 Minuten [Revnivykh 2008].



**Abbildung 4-4 Konstellation der GLONASS- Satelliten [Mansfeld 1998]**

Die starke Neigung der Bahnen in der Konstellation GLONASS wurde ursprünglich entworfen, um das System in hohen Breiten zur Verfügung zu stellen und dadurch eine bessere Überdeckung der Länder der ehemaligen Sowjetunion zu ermöglichen [Roßbach 2000].

Das Kontrollsegment beinhaltet alle Bodenstationen, die die Satellitensignale verfolgen, und auch die Stationen, die für die Berechnung am Boden zuständig sind. Bei dem GLONASS-System befinden sich alle diese Stationen auf dem Territorium der russischen Föderation. Die Positionierung der Stationen ist sehr problematisch in Bezug auf die Integrität des Systems.

Das Nutzersegment besteht von allen Benutzern des Systems (siehe auch Abschnitt 4.2.1.3 und Abschnitt 4.4.3.4).

### 4.3.2 Das GLONASS-Signal

Wie im Fall des GPS-Systems sendet jeder GLONASS-Satellit seine Signale auf zwei unterschiedliche Frequenzen. Im Gegensatz zu GPS sendet aber jeder Satellit auf einer eigenen Frequenz und die Empfänger unterscheiden die Satelliten anhand der Frequenz

[Mansfeld 1998].

Die Trägerfrequenzen der GLONASS-Satelliten liegen im gleichen Frequenzbereich wie die Trägerfrequenzen der GPS-Satelliten (L-Band,  $\lambda \approx 0,20$  m). Jeder Satellit nutzt eine eigene Frequenz – FDMA (Frequency Division Multiplex Access)-Technologie.

Die Hochfrequenz-Träger L1 und L2 werden von einer gemeinsamen Grundfrequenz abgeleitet [Langley 1997].

$$f_{L_1}^K = 1602 + 0.5625 * K \text{ MHz} \quad (4-1)$$

$$f_{L_2}^K = 1246 + 0.4375 * K \text{ MHz} \quad (4-2)$$

Wobei K die Kanalnummer des Satelliten bezeichnet.

Benachbarte Frequenzen haben einen Abstand von  $\Delta f_1 = 0,5625$  MHz bei dem Träger L1 und  $\Delta f_2 = 0,4375$  MHz bei dem Träger L2. Da für den Zahlenwert von K bei 24 Satelliten nur 12 Zahlenwerte zur Verfügung stehen, erhalten je zwei Satelliten in entgegengesetzter Position auf der Umlaufbahn (Anti-poden) die gleiche Frequenz [Mansfeld 1998; Schnieder 2007].

Für die Ortung und Navigation sendet jeder Satellit gleichzeitig Signale auf zwei Trägern mit unterschiedlicher Frequenz aus. Die damit erzielten Entfernungsmessergebnisse weisen wegen der unterschiedlichen atmosphärischen Laufzeitverzögerungen Differenzen auf. Diese Differenzen bieten die Möglichkeit einer Eliminierung der Messfehler [Roßbach 2000].

## 4.4 GALILEO

GALILEO ist der Name des europäischen Satellitennavigationssystems. Da das russische GLONASS und das amerikanische GPS-System unter dem Einfluss des Militärs stehen und für europäische Anwendungen auf dem Gebiet der Satellitennavigation nur eingeschränkte Zuverlässigkeit besitzen, startete die Europäische Union (EU) gemeinsam mit der Europäischen Weltraumorganisation ESA das Projekt GALILEO [EC 1999]. Es wurde für zivile und kommerzielle Zwecke konzipiert. GALILEO ist somit unabhängig von GPS, aber trotzdem ist die Interoperabilität durch eine entsprechende Spezifikation des GALILEO-Systems gewährleistet [Galileo 2002].

Im Gegensatz zu GPS bietet GALILEO, das für die zivile Nutzung gedacht ist, nicht nur kostenlose Anwendungen, sondern auch Dienste mit unterschiedlichen Zugangs-codes an.

### 4.4.1 Dienste von GALILEO

GALILEO bietet ein breites Dienstspektrum an. Einige Dienste werden durch GALILEO selbstständig angeboten („Satellite-only“-Dienste) und andere werden in Kombination mit weiteren Satellitennavigationssystemen zur Verfügung gestellt. Das führt dazu, dass die GALILEO-Dienstleistungen in vier Kategorien eingestuft werden [ESA 2002b]:

- Dienste der GALILEO-Satelliten (GALILEO Satellite-only Services): Es sind insgesamt vier Navigationsdienste und ein Dienst zur Unterstützung von „Search and Res-

cue"-Operationen (SAR) unabhängig von den anderen Navigationssystemen durch Kombination der GALILEO-Signale weltweit vorgesehen [ESA 2005a].

- Dienste mit lokaler Unterstützung (GALILEO locally assisted services): Die GALILEO Dienste werden durch die lokale GALILEO Komponente erweitert, um leistungsfähigere Dienstleistungen für spezielle Anwendungen zu ermöglichen [ESA 2005b].
- EGNOS Dienste: EGNOS ist ein europäisches satellitengestütztes Erweiterungssystem, das die Leistungsangebote von GPS und GLONASS erweitert. Die Dienste von EGNOS werden mit den GALILEO-only-services kombiniert [ESA 2005a, ESA 2006b].
- Kombinierte Dienste (GALILEO combined services): die GALILEO-Signale können auch mit anderen GNSS- (GLONASS, GPS) oder Nicht-GNSS-Systemen (z.B. GSM und UMTS) kombiniert werden [ESA 2006a].

Im folgenden Abschnitt werden die reinen satellitenbasierten GALILEO-Dienste („Satellite-only“-Dienste) dargestellt.

#### **4.4.1.1 Offener Dienst (Open Service - OS)**

Der offene Dienst soll für jeden Nutzer frei und kostenlos zugänglich sein. Dieser Dienst ist vergleichbar mit dem zivilen GPS-Signal, allerdings mit einer verbesserten Qualität und Zuverlässigkeit.

Auf der Basis von OS werden Dienste von allgemeinem Interesse zu Ortungs-, Navigations- und Zeitsynchronisationszwecken aufgebaut. Daten über die eigene Position mit einer Genauigkeit von wenigen Metern und die Uhrzeit mit der Genauigkeit einer Atomuhr (besser als  $10^{-13}$ ) werden geliefert [ESA 2002b].

#### **4.4.1.2 Kommerzieller Dienst (Commercial Service, CS)**

Der CS ist ein gebührenpflichtiger Dienst und bietet Zugänge, die für kommerzielle Dienstanbieter angeboten werden.

Er stellt im Vergleich zum OS einen Zugang zu zwei zusätzlichen Signalen für professionelle Nutzer, die einen höheren Datenrate-Durchsatz und eine verbesserte Genauigkeit ermöglichen, zur Verfügung. Es besteht die Möglichkeit, auch spezifische Nachrichten an die Nutzer zu übertragen wie beispielsweise Korrekturdaten zur Steigerung der Positionsgenauigkeit.

Der CS ist sehr gut geeignet für Anwendungen, die eine hohe Zuverlässigkeit und eine Integritätsinformation benötigen. Dieser Dienst bietet somit ein höheres Leistungspotenzial, insbesondere auch bezogen auf die Funktionsgarantien [ESA 2002b].

#### **4.4.1.3 Sicherheitskritischer Dienst (Safety of Life Service, SoL)**

Der SoL Dienst ist ein weltweit verfügbarer, verschlüsselter Dienst. Er wird für sicherheitskritische Anwendungen, bei denen die garantierte Genauigkeit und die Integrität wesentlich sind, wie beispielsweise aus dem Bereich der Luftfahrt, der Schifffahrt sowie des Schienenverkehrs, angeboten. Eine Integritätsnachricht ermöglicht die Feststellung, ob die empfangene Satelliteninformation zuverlässig ist.

Für die Kontinuität dieses Dienstes wird eine Garantie gegeben, indem der Dienst nur durch die Verwendung zertifizierter Empfänger, jeweils mit zwei Signalfrequenzen (L1 und E5), genutzt werden kann [ESA 2005a].

Der wesentliche Unterschied zum Offenen Dienst ist die hohe Integrität, die nötig ist, wenn im Fall einer Beeinträchtigung des Navigationssystems lebensbedrohliche Situationen auftreten könnten (siehe Tabelle 4-4) [ESA 2002b].

### **4.4.1.4 Öffentlich regulierter Dienst (Public Regulated Service, PRS)**

Der öffentlich regulierte Dienst ist ein zugriffsgeschützter, verschlüsselter und störresistenter Dienst für staatliche Zwecke, welcher von Benutzergruppen wie z.B. Polizei, Feuerwehr und Grenzschutz genutzt werden soll, also Nutzern, die ein hohes Maß an Dienstkontinuität benötigen. Als „Dual-Use-System“ wird es unter Umständen auch Kunden aus dem militärischen Bereich ansprechen.

Der Zugang zum PRS wird durch zivile Institutionen kontrolliert. Das Ziel des PRS-Dienstes ist es, die Wahrscheinlichkeit einer ständigen Verfügbarkeit des Signals im Weltraum trotz drohender Interferenzen zu verbessern.

Der PRS bietet ein größeres Maß an Schutz als die anderen Dienste (OS, CS, und SoL). Dieser Effekt wird erreicht Dank der Verwendung geeigneter Technologien zur Interferenzabschwächung [ESA 2002b].

### **4.4.1.5 Such- und Rettungsdienst (Search and Rescue, SAR)**

Der Such- und Rettungsdienst ist Europas Beitrag zum internationalen, kooperativen Bestreben nach humanitären Rettungs- und Suchdiensten, die in der COSPAS-SARSAT-Initiative umgesetzt ist.

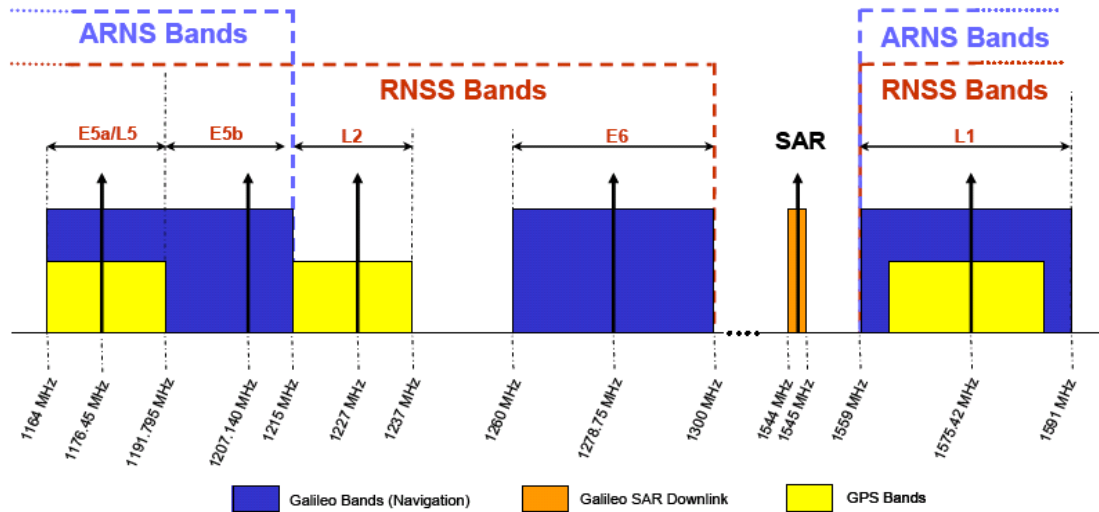
Der SAR/GALILEO soll die Leistungsfähigkeit des bereits bestehenden COSPAS-SARSAT Systems deutlich verbessern und erweitern [ESA 2002b].

## **4.4.2 Signale und Frequenzen von GALILEO**

Jeder GALILEO-Satellit sendet zehn Navigationssignale, die in vier Frequenzbändern übertragen werden.

### **4.4.2.1 Frequenzbänder von GALILEO**

Die Frequenzbänder sind in dem Spektrum für Radionavigations-Satellitendienste (RNSS) gewählt worden und zusätzlich befinden sich die Bänder E5a, E5b und L1 im für aeronautische Radionavigationsdienstleistungen (ARNS) vorgesehenen Spektrum. Das SAR-Signal sendet in einem der Frequenzbänder (L6-Band: 1544-1545 MHz), der für den Notdienst reserviert ist. Das SAR-Notsignal wird im 406 MHz-Band empfangen und im L6-Band an spezielle Bodenstationen übertragen [ESA 2006a, ESA 2002b, ESA 2007].



**Abbildung 4-5 Frequenzen von GALILEO [ESA 2006b]**

Diese Aufteilung der Frequenzen ist gewählt worden, da sie die wenigsten Interferenzen mit GPS und wenige Mehrwegeausbreitungen hervorruft. Je nach dem verwendeten Dienst werden unterschiedliche Frequenzen genutzt [Schnieder 2007].

Die Trägerfrequenzen und der dazugehörige Navigationsdienst sowie Frequenzbandbreite und Ranging Code sind in Tabelle 4-1 dargestellt:

**Tabelle 4-1 GALILEO Trägerfrequenzen und ihre Navigationsdienste**

Frequenz-Band	Trägerfrequenz [MHz]	Bandbreite [MHz]	Ranging Code-Type (Ortungssignale)	OS	CS	SoL	PRS
E5a	1176,45	24	Offener Zugang	X		X	
E5b	1207,14	24		X	X	X	
E6	1278,75	40	Kommerzielle / staatliche Verschlüsselung		X		X
L1	1575,42	32,736	Offener Zugang	X	X	X	X

#### 4.4.2.2 Signale von GALILEO

Die zehn Navigationssignale von GALILEO sind wie folgt auf die verschiedenen Frequenzbänder verteilt [ESA 2002b].

- Signale im Frequenzband E5a und E5b (1164-1215 MHz)
- 3 Signale im Frequenzband E6 (1260-1300 MHz)
- 3 Signale im Frequenzband L1 (1559-1591 MHz)

Die GALILEO Navigationssignale beinhalten Kodierungen zur Streckenmessung (Ranging Code) sowie Positions- und Datenmeldungen. Es gibt unterschiedliche Typen von Ranging Code und Daten [ESA 2006b].

Der Ranging Code ist ein Ortungssignal, das zur Messung der Entfernungen dient. Dieser Code besteht aus einer Bitfolge mit den Parametern Zeit (Code-Länge) und Frequenz (Chiprate). GALILEO hat 3 Typen von Ranging Codes:

- Unverschlüsselter offener Ranging Code
- Verschlüsselter Ranging Code für kommerzielle Nutzer
- Verschlüsselter Ranging Code für staatliche Institutionen

Die Daten, die von GALILEO-Satelliten abgestrahlt werden, lassen sich in 5 Gruppen unterteilen: Navigationsdaten (Ephemeridendaten, Almanachdaten, usw.), Integritätsdaten (eventuell fehlerhafte Satelliten werden in Echtzeit erkannt und deren Defekt im Navigationssignal den Nutzern mitgeteilt), kommerzielle Daten, PRS-Daten und SAR-Daten. Diese Daten werden verschlüsselt (kommerzielle und PRS-Daten) oder unverschlüsselt (Navigationsdaten, Integritätsdaten und SAR-Daten) gesendet [ESA 2005a].

Grundsätzlich werden die Modulationsarten BPSK (Binary Phase Shift Keying) und BOC (Binary Offset Carrier) verwendet. Durch die BOC-Modulation wird das Signal besser über die zur Verfügung stehende Bandbreite verteilt, und der Einfluss gegenüber Signalreflexionen (Multipath) beim Empfang des Navigationssignals wird im Vergleich zu BPSK verringert [ESA 2006b, ESA 2007; Schnieder 2007].

Die Tabelle 4-2 listet die GALILEO-Signalparameter auf [ESA 2002b, ESA 2005a]:

Bezeichnungen:

- **BPSK(10)**: Binäre Phasenumtastung mit 10,23 MHz
- **BPSK(5)**: Binäre Phasenumtastung mit 5,115 MHz
- **BOC(fs, fc)**: Binary Offset Carrier mit Sub-Carrier-Frequenz (Unterträger) fs und einer Code-Rate fc
- **A, B, C**: Kanal-Bezeichnungen eines 3-Kanal-Signals

**Tabelle 4-2 GALILEO Signalparameter [ESA 2002b]**

Signale			Trägerfrequenz [MHz]	Modulation	Chiprate [Mcps]	Code- Verschlüsselung	Datenrate Symbol/s (bit/s)	Daten- Verschlüsselung
Nr.	Name	Data/Pilot						
1	E5a-I	Data	1176,45	BPSK(10)	10	Nein	50 (25)	Nein
2	E5a-Q	Pilot	1176,45	BPSK(10)	10	Nein	Keine Daten	Keine Daten
3	E5b-I	Data	1207,14	BPSK(10)	10	Nein	250 (125)	Nein
4	E5b-Q	Pilot	1207,14	BPSK(10)	10	Nein	Keine Daten	Keine Daten
5	E6-A	Data	1278,75	BOC(10,5)	5	Regierung	250 (125)	Ja
6	E6-B	Data	1278,75	BPSK(5)	5	Kommerziell	1000 (500)	Ja
7	E6-C	Pilot	1278,75	BPSK(5)	5	Kommerziell	Keine Daten	Keine Daten
8	L1-A	Data	1575,42	BOC(n,m)	M	Regierung	250 (125)	Ja
9	L1-B	Data	1575,42	BOC(2,2)	2	Nein	250 (125)	Nein
10	L1-C	Pilot	1575,42	BOC(2,2)	2	Nein	Keine Daten	Keine Daten



### 4.4.3 Systemarchitektur von GALILEO

Die Systemarchitektur (siehe Abbildung 4-6) von GALILEO ist umfangreich und besonders auf die vielfältigen Dienste konzipiert. Die Architektur umfasst vier Hauptkomponenten: Globale Komponente, Lokale Komponente, Regionale Komponente, Nutzersegment (User Segment).

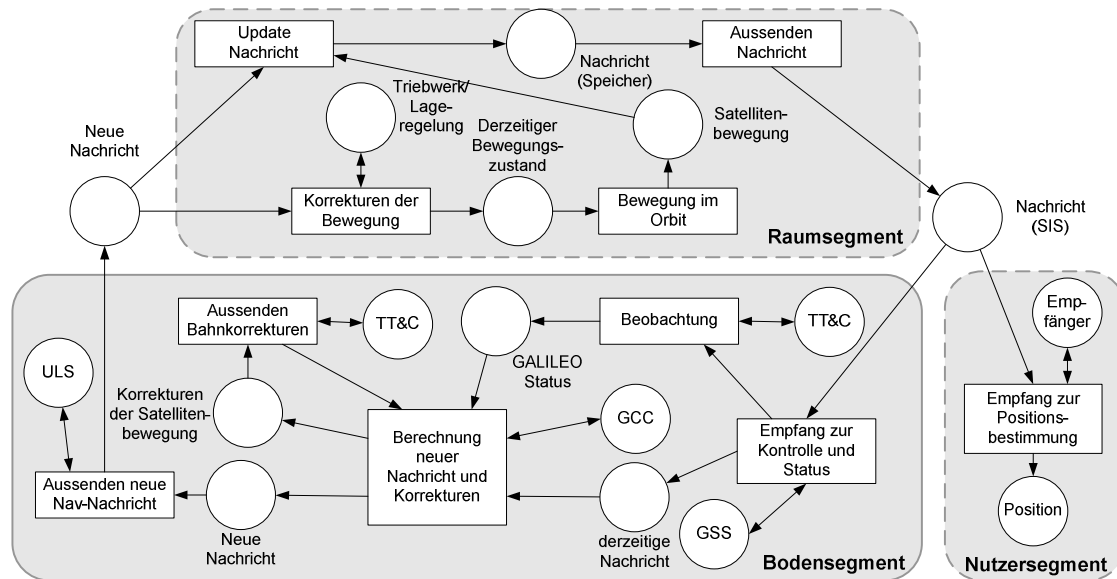


Abbildung 4-6 GALILEO Systemarchitektur nach [Becker et al. 2008]

#### 4.4.3.1 Globale Komponente

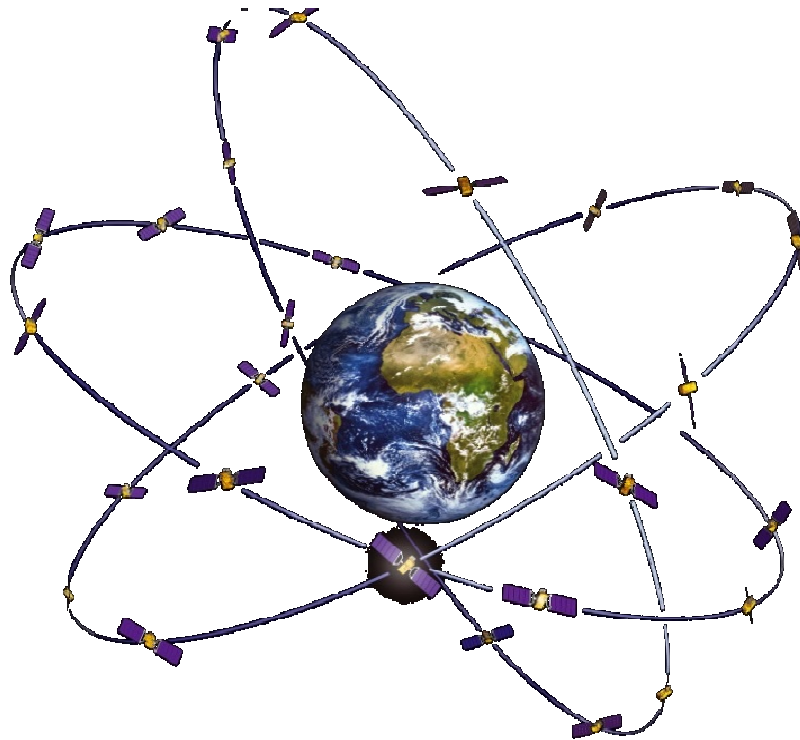
Die Globale Komponente ist die Kerninfrastruktur des GALILEO Systems. Sie enthält alle notwendigen Elemente, die für die „GALILEO-satellite only services“ zur Verfügung stehen. Die wesentlichen globalen Komponenten sind das Raumsegment mit den Satelliten und das Bodensegment mit dem Kontrollsegment, das für die Überwachung und Beeinflussung der GALILEO-Satelliten durch den Betreiber unterhalten wird.

##### *GALILEO Raumsegment*

Es soll sich insgesamt aus 30 MEO (Medium Earth Orbit) Satelliten (davon 3 Ersatzsatelliten) aufbauen, welche die Erde auf 3 Bahnen mit einer Höhe über der Erdoberfläche von 23616 km umkreisen. Die Neigung der Satellitenbahnen zum Äquator beträgt  $56^\circ$  (siehe Abbildung 4-7). Damit wird eine bessere Überdeckung der gesamten Erdoberfläche im Vergleich zu GPS erreicht. Auf jeder Ebene befinden sich neun Satelliten, die jeweils um 40 Grad versetzt sind. Der zehnte wird als Reserve in der jeweiligen Bahnebene vorgehalten. Im Falle des Ausfalls eines Satelliten übernimmt der Ersatzsatellit in der betreffenden Bahn dessen Funktion. Die Abweichung eines Satelliten von seinem Platz innerhalb der Bahnebene darf höchstens 2 Grad betragen [Airservices Australia 2007; ESA 2005b, ESA 2002a, ESA 2001].

Mit dieser Konstellation stehen mindestens vier, in der Regel sechs bis acht Satelliten zur Verfügung. Diese Konfiguration bezeichnet man auch als Walker 27/3/1 (+3 Ersatzsatelliten) Konstellation. Die GALILEO-Satelliten werden eine Größe von  $2,7 \times 1,2 \times 1,1 \text{ m}^3$  und ein Startgewicht von ca. 700 kg besitzen. Jeder Satellit trägt als Nutzlast einen Transponder für den Such- und Rettungsdienst. Die Nutzlast des Satelliten setzt sich aus den Atomuhren, dem

Signalgenerator mit Rechneinheit, dem Frequenzgenerator sowie dem Endverstärker und der L-Band Antenne zusammen [ESA 2002b, ESA 2006b, ESA 2007].



**Abbildung 4-7 GALILEO Konstellation [ESA 2002b]**

#### *GALILEO Bodensegment*

Das GALILEO Bodensegment besteht aus zwei Hauptteilen, die unterschiedliche Funktionen übernehmen. Das Ground Mission Segment (GMS) ist zuständig für die Bereitstellung und Überwachung der Navigationssignale, während das Ground Control Segment (GCS) den Betrieb der Satelliten im Orbit sicherstellt. Bei der Aufgabe des GMS handelt es sich um die Integritätsbestimmung des Systems. Es wird dabei überprüft, ob sich das vom Satellit ausgesendete Signal innerhalb der vorgegebenen Toleranz befindet.

Zu den wichtigsten Komponenten des Ground Segments gehören folgende:

- Das GCC (GALILEO Control Centre) dient zur Navigations- und Satellitenkontrolle. Kern des Bodensegments bilden zwei GALILEO-Kontrollzentren, die in Deutschland und in Italien angesiedelt sind. Sie werden die Konstellation, die Synchronisierung der Atomuhren der Satelliten, die Integrität der Signalverarbeitung sowie die Datenverarbeitung sämtlicher interner und externer Elemente steuern. Die Kontrollzentren sind über ein redundantes Netzwerk mit der sog. Sensor Station verbunden und werden von dieser mit Daten versorgt [ESA 2006a].
- GSS (GALILEO Sensor Station). Die von den Sensorstationen gemessenen Daten bilden die Berechnungsgrundlage für die Kontrollzentren. Diese Daten dienen zur Integritätsbestimmung und zur Vorhersage der Umlaufbahn- und Uhrenparameter. Die Zahl der GSS variiert in der Literatur zwischen 20 und 40.
- Die TT&C (Telemetry Tracking & Command Station) dienen der Kontrolle der Satel-

liten im S-Band. Sie werden für den Datenaustausch zwischen den Kontrollzentren und den Satelliten benötigt. Fünf solcher Stationen gehören zum GALILEO Bodensegment.

- ULS (Uplink Stations). Sie sind für das Senden der Navigations- und Integritätsdaten von den Kontrollzentren zu den Satelliten verantwortlich. Dies geschieht mit Hilfe sog. C-Band-Antennen.

#### **4.4.3.2 Lokale Komponente**

Lokale Komponenten sind vorgesehen, um das Leistungsangebot von GALILEO vor Ort für professionelle Nutzer zu ergänzen, so genannte Mehrwertdienste. Sie werden das GALILEO System um Funktionen zur lokalen Datenübertragung mit Hilfe terrestrischer Funkverbindungen oder bestehender Kommunikationsnetze erweitern, um Genauigkeit und Integrität des Systems in der Nähe von Flughäfen, Häfen, Schienenstrecken, Straßen, Straßentunnel, Tiefgaragen zu verbessern. Eine lokale Komponente muss typischerweise die Signalweiterleitung einschließlich der Überwachung der Signalintegrität, Datenverarbeitung und -übermittlung leisten [ESA 2002b].

#### **4.4.3.3 Regionale Komponente**

Regionale Komponenten werden als unabhängige Systeme die Integrität der GALILEO-Dienste gewährleisten. Über GALILEO Uplinkkanäle werden regionale Dienstanbieter regionale Integritätsdaten übertragen. Die regionale Komponente von GALILEO kann aus verschiedenen regionalen Integritätssystemen (ERIS – External Region Integrity System) bestehen und von Organisationen, Ländern oder Ländergruppen außerhalb Europas eingerichtet und betrieben werden, um unabhängig vom GALILEO System Dienste hoher Integrität zu erhalten, (z.B. durch die Verbindung mit GPS und GLONASS), können zusätzliche Informationen zur Integrität gewonnen werden. In den regionalen Komponenten ist auch EGNOS (siehe Abschnitt 4.6) in das System GALILEO einbezogen.

#### **4.4.3.4 Nutzersegment**

Das GALILEO Nutzersegment setzt sich, vergleichbar zu GPS und GLONASS, aus allen Anwendern zu Wasser, auf dem Land, in der Luft und im Weltraum zusammen. Die Nutzer unterscheiden sich nach der Wahl eines Dienstes (OS, CS, SoL, PRS). Die Empfänger, die von den Nutzern verwendet werden, sind entweder für einen bestimmten Dienst konzipiert oder es sind Universalempfänger, die wahlweise jeweils einen bestimmten Dienst in Anspruch nehmen können. Die Universalempfänger haben folgende Funktionen [ESA 2002b]:

- Direktempfang der GALILEO SIS
- Zugang zu den Dienstleistungen, die von der regionalen und lokalen Komponente bereitgestellt werden
- Interoperabilität mit anderen Systemen

#### **4.4.3.5 Zeit- und Referenzsysteme von GALILEO**

In der englischen Literatur werden oft die Bezeichnungen „Reference System“ und „Reference Frame“ (Deutsch: Referenzrahmen) verwendet. Laut [Rothacher 2007] ist ein „Reference System“ definiert durch Konventionen und Modelle (z.B. Massenschwerpunkt der Erde als

Ursprung, Orientierung der Achsen im Raum, physikalische Gesetze und Konventionen über die Verwendung bestimmter Approximationen und Modellbildungen). Das International Terrestrial Reference System (ITRF) ist ein Beispiel eines Reference Systems. Ein „Reference Frame“ ist die Materialisierung und konkrete Realisierung eines Referenzsystems. Im Deutschen werden häufig die Bezeichnungen „Koordinatensystem“ bzw. „Referenzsystem“ sowohl für das System selbst als auch für dessen Realisierung verwendet.

#### 4.4.3.6 GALILEO Referenzsystem

Um die Koordinaten der GALILEO-Satelliten darzustellen, wird eine neue Realisierung des ITRS (International Terrestrial Reference System) verwendet, um die Konsistenz sicherzustellen. Diese wird GTRF (GALILEO Terrestrial Reference Frame) genannt. Das System wird mittels der geplanten 30 bis 40 GALILEO Sensor Stations (GSS) realisiert werden [ESA 2002a].

#### 4.4.3.7 GALILEO Zeitsystem

Die GALILEO-Zeit GST (GALILEO System Time) soll mit TAI (Temps Atomique International) innerhalb von 50 ns (95%) übereinstimmen. Hierzu soll GST kontinuierlich mit hochpräzisen Atomuhren verglichen werden, welche in die Generierung von TAI eingebunden sind. GST wird also keine Schaltsekunden aufweisen [Rothacher 2007]. Die Internationale Atomzeit TAI beruht auf den SI-Sekunden und ist eine Zeitskala, die von einem weltweiten Netzwerk von Atomuhren abgeleitet wird.

## 4.5 Vergleich von GALILEO und GPS

In diesem Abschnitt wird ein Vergleich zwischen dem GALILEO-System und dem derzeit am meisten verbreiteten Satellitennavigationssystem GPS durchgeführt. Das russische System GLONASS hat bisher keine nutzbaren zivilen Anwendungen hervorgebracht, so dass GALILEO zurzeit die einzige relevante Konkurrenz des amerikanischen GPS werden kann. Aufgrund der eingetretenen politischen Veränderungen und bedingt durch finanzielle Schwierigkeiten spielt GLONASS immer noch eine untergeordnete Rolle. Eine Interoperabilität von GALILEO und GPS ist vorgesehen. Aus diesen Gründen ist ein Vergleich von GALILEO und GPS besonders wichtig [Zogg 2006b]. Ein kurzer Vergleich der Architektur von GALILEO und GPS wird in der folgenden Tabelle 4-3 dargestellt.

**Tabelle 4-3 Systemarchitektur von GALILEO und GPS**

	GPS	GALILEO
Satelliten Konstellation	24 Satelliten (21 aktive und 3 Reserve Satelliten)	30 Satelliten (27 aktive und 3 Reserve Satelliten)
	20180 km Höhe	23616 km Höhe
	55° Bahnneigung	56° Bahnneigung
	11h58min Umlaufzeit;	14h04min Umlaufzeit;
Raumsegment, Bodensegment und Nutzersegment	5 (6) Monitorstationen	ca. 40 Monitorstationen
	3 Uplink Stationen	9 Uplink Stationen
	keine TTC-Stationen (Sendestationen)	5 TTC-Stationen (Sendestationen)
	eine Zentrale (Kontrollzentrum)	2 Zentralen (Kontrollzentrum)
	2 Nutzergruppen: zivile und autorisierte (militärische) Nutzer	5 Nutzergruppen: OS, CS, SoL, PRS, SAR

Trotz vieler technischer Gemeinsamkeiten bietet GALILEO aber einige systembedingte Vorteile gegenüber der zweiten Generation von GPS [Antova 2006]:

- Unabhängigkeit vom amerikanischen Militär
- Genauere Uhren
- Bessere Überdeckung (genauer an Nord- und Südpol) und Genauigkeit aufgrund der Konstellation (27 statt 24 Satelliten, Inklination).
- Zusätzliche Integritätsinformation
- Dienstgarantien (Kommerziell und SoL Service)
- Mehrere Dienste statt 2 angebotener Dienste bei GPS

## **4.6 GNSS Augmentation Systeme**

Die GNSS Augmentation bezieht sich darauf, externe Informationen zu verwenden, um die Genauigkeit, Verfügbarkeit oder Zuverlässigkeit des Satellitennavigationssignals zu verbessern. Es gibt unterschiedliche GNSS Augmentation Systeme. Die Beschreibung oder die Namen dieser Systeme hängen im Allgemeinen von der Art ab, wie der GNSS Empfänger die Informationen erhält. Sie sind in drei Kategorien unterteilt [ICAO 2007]: on-board, ground-based (Bodengestützt) und satellite-based (Satellitengestützt). Daraus ergeben sich vier GNSS Augmentation Systeme:

- ABAS (aircraft-based Augmentation System)- RAIM, AAIM, FANS
- GBAS (ground-based Augmentation System)- LAAS
- GRAS (ground-based regional Augmentation System)- GRAS
- SBAS (satellite-based Augmentation System)- WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN

### **4.6.1 ABAS: Aircraft-Based Augmentation System**

ABAS ist ein Augmentation System, das die Informationen von GNSS-Signalen mit den Informationen, die an Bord eines Flugzeugs vorhanden sind, integriert. Es sollte somit die Integrität und die Verfügbarkeit der GNSS-Signale verbessern. Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) ist eine Art der ABAS Technik. Es erlaubt den Zustand, die durch Satellitenkonstellationen empfangene Signale zu prüfen. Im Fall eines unannehmbaren Positionsfehlers, der durch Satelliten übermittelt wurde, wird ein Alarm ausgelöst. Diese Funktion ist nicht verfügbar, wenn die Anzahl der empfangenen Satelliten ungenügend (weniger als 5 Satelliten) oder ihre Geometrie ungünstig ist [ICAO 2007].

FDE (Fault Detection and Exclusion) ist eine erweiterte Version von RAIM, die in einigen Empfängern eingesetzt wird.

Neben RAIM gibt es auch AAIM (Aircraft Autonomous Integrity Monitoring) das INS (Inertial Navigation System) mit integriert. AAIM wird besonders genutzt, wenn die Satellitennavigationsantennen bei Flugmanövern abgeschattet werden oder während kurzen Perioden, in denen ungenügend Satelliten zu sehen sind.

## 4.6.2 GBAS: Ground-Based Augmentation System

GBAS ist ein Augmentierungssystem, das nur Bodenkomponenten nutzt. Mit Hilfe eines bodenseitigen Empfängers werden die Satelliten überwacht und die Korrekturen (Satelliten-, Ionosphären- und Troposphärenkorrektur) generiert. Das System bedient sich des Prinzips des so genannten Differential GPS (DGPS), das der Erhöhung der Ortungsgenauigkeit dient. Das Local Area Augmentation System (LAAS) ist das GBAS der ICAO (International Civil Navigation Organisation). Die Korrekturen sowie Informationen über den Anflug und die Integrität der Satelliten werden anhand von lokal betriebenen Referenzstationen berechnet und mittels eines Datenkanals an anfliegende Flugzeuge übermittelt. LAAS in der Luftfahrt wird für Start und Landung verwendet [ICAO 2007; Airservices Australia 2007].

## 4.6.3 GRAS: Ground-Based Regional Augmentation System

GRAS- System ist eine Definition der ICAO, das die Funktion von GPS/GNSS im Bezug auf die Sicherheit in der Zivilluftfahrt erhöht. Es ist eine Mischung zwischen SBAS und GBAS. Es benutzt zwar SBAS Bodenstationen, überträgt aber zum Flugzeug im gleichen Format und auf dem gleichen Frequenzband wie das GBAS [ICAO 2007]. Abbildung 4-8 zeigt einen Überblick über ein GRAS-Systems vom Typ B.

Die GRAS Reference Station (GRS) überwacht und sammelt GNSS-Daten. Diese GNSS-Daten werden nach einer Formatierung an die GRAS Master Station (GMS) übertragen. Der GMS verarbeitet die Informationen (Korrekturen und Integritätsinformationen des Systems), sendet diese Daten im SBAS-Format und führt die gleiche Aufgabe wie eine SBAS Master Station durch, so dass es einen zentralen Verarbeitungsservice für das Berechnen von Differentialkorrekturinformationen hat [ICAO 2007].

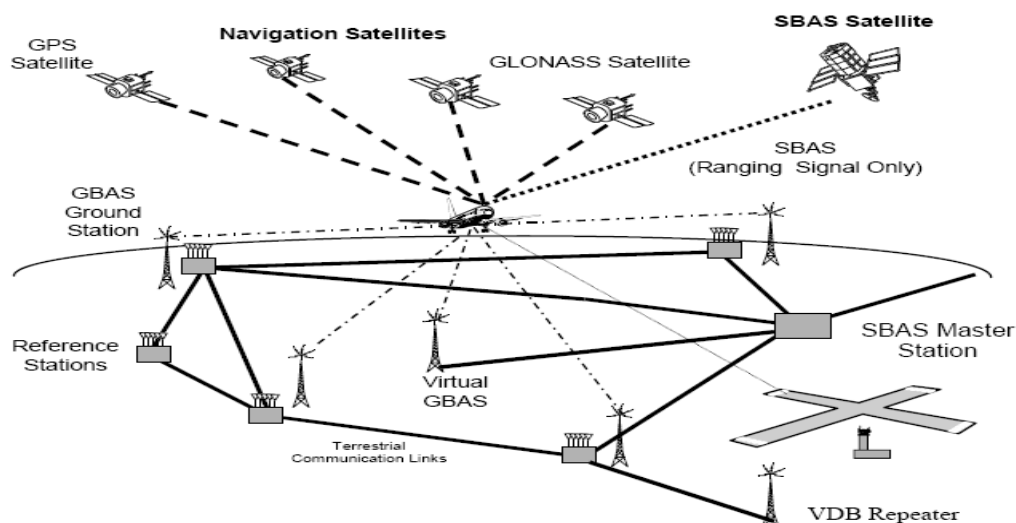


Abbildung 4-8 Systemarchitektur GRAS Typ B [Airservices Australia 2007]

## 4.6.4 Satellite-Based Augmentation System

Satellitengestützte Erweiterungssysteme (Satellite-Based Augmentation System, SBAS) sind

Systeme, die die Funktionen von GPS, GLONASS und später GALILEO erweitern. Sie ermöglichen die Verbesserung der GNSS bezüglich ihrer Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit. Das System versendet die durch verteilte Bodenstationen ermittelte Integritäts- und Korrekturinformationen über einen geostationären Satelliten an das Benutzersegment. Da bestehende GNSS-Systeme (GPS, GLONASS) die Integritätsinformation nicht direkt in ihren Datenaussendungen übertragen, ist die Benutzung von Erweiterungssystemen wie SBAS für sicherheitskritische Anwendungen relevant. Hauptnutzer des SBAS-Systems ist die Luftfahrt, die besonders an den Integritätsinformationen interessiert ist. Die Korrekturinformationen verbessern die horizontale und vertikale Ortsauflösung und erhöhen damit die Ortungsgenauigkeit und geben darüber hinaus Auskunft über die Qualität der Signale.

Zurzeit existieren weltweit drei SBAS-Betreiber (WAAS, MSAS und EGNOS) und weitere, die geplant oder im Aufbau sind:

- WAAS (Wide Area Augmentation Service), USA
- CWAAS (Canada Wide Area Augmentation Service), Kanada
- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), Europa
- MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System), Japan
- SNAS (Satellite Navigation Augmentation System, China
- GAGAN (GPS-Aided Geo Augmented Navigation), Indien
- QZSS (Quasi Zenith Satellite System), Japan
- SACCSA (Sistema de Aumentación para el Caribe, Centro y Sudamérica), Süd Amerika

Zur Abdeckung anderer Regionen sind zurzeit weitere SBAS Systeme in der Studien- oder Entwicklungsphase (GAGAN in Indien, CWAAS in Kanada, SNAS in China und SACCSA in der Karibik, Zentral- und Südamerika) [ICAO 2007]. Eine Interoperabilität dieser Systeme ermöglicht demselben Empfänger gemäß dem Standard SBAS den Zugriff auf alle Dienste und erhöht somit die gesamte Leistung.

#### **4.6.4.1 EGNOS**

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) ist die erste Phase des europäischen GNSS und wird von der europäischen Tripartite Group (ETG) entwickelt, die von der ESA, EC und EUROCONTROL konzipiert ist. Das Hauptziel besteht in der Verbesserung der Leistung der militärischen Satellitensysteme GPS und GLONASS für zivile Anwendungen. Es werden vor allem Korrektur- und Integritätsdaten mit Hilfe von mehreren geostationären Satelliten (GEO-Satelliten) ausgesendet [ESA 2006a]. EGNOS ist in drei Segmente strukturiert (siehe Abbildung 4-9**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**):

- Das Bodensegment ist der Echtzeitteil von EGNOS. Er berechnet präzise differenzierte Korrekturen sowie die „GEO Ranging“ und stellt diese Informationen allen Nutzern durch das Raumsegment zur Verfügung. Das Bodensegment besteht aus RIMS-Stationen (Ranging and Integrity Monitoring Stations), MCC-Stationen (Mission Control Centers) und NLES-Stationen (Navigation Land Earth Stations). Die RIMS-Stationen, die geographisch verteilt sind, registrieren die Daten von GPS und GLO-

NASS. Die vier MCC-Stationen sammeln alle Informationen, berechnen die Differentialkorrekturen und die Genauigkeit aller sichtbaren Satelliten. Dann senden die NLES-Stationen diese Informationen an die Geostationären-Satelliten (GEO-Satelliten) weiter.

- Das Raumsegment besteht aus drei GEO-Satelliten.
- Das Nutzersegment besteht aus EGNOS-Empfängern, die ihren Nutzern ermöglichen die genaue Position zu berechnen.

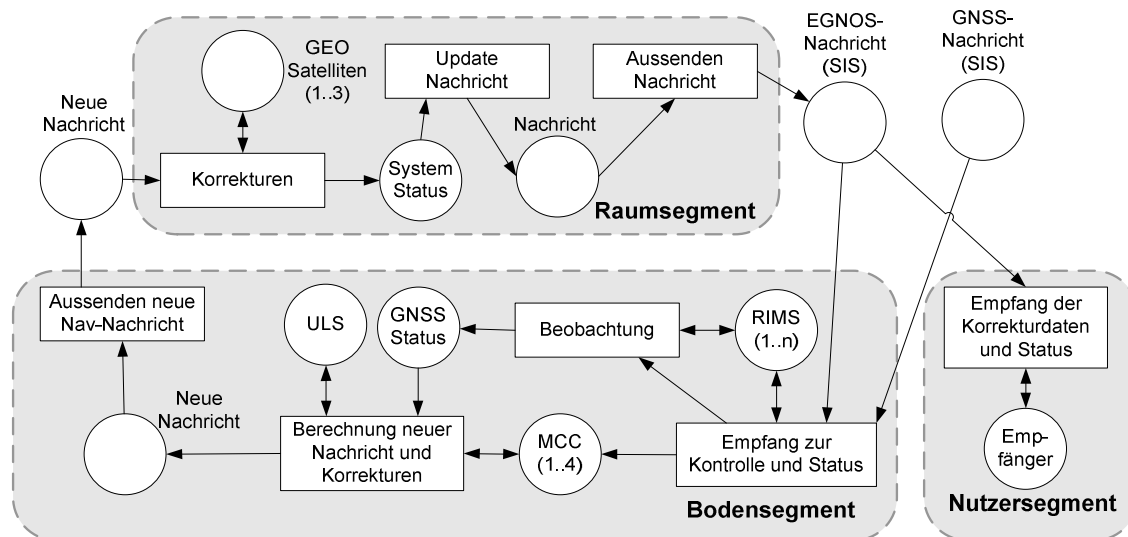


Abbildung 4-9 EGNOS Systemarchitektur nach [ESA 2006a]

Die drei wichtigsten Funktionen von EGNOS sind:

- **GEO Ranging (R-GEO):** Die Übertragung eines zu GPS vergleichbaren Signals von drei GEO-Satelliten (Inmarsat-3 AOR-E, Inmarsat-3 IOR-W und ESA Artemis) erhöht die Anzahl der verfügbaren Satelliten für die Nutzer.
- **„GNSS Integrity Channell“ (GIC):** Die Integrität der Informationen bietet ein gefordertes Sicherheitsniveau für sicherheitskritische Anwendungen. Diese Funktion kann mit GALILEO und mit dem modernisierten GPS (GPS-V3) realisieren werden.
- **„Wide Area Differential“ (WAD):** Erhöht die Genauigkeit der Positionsbestimmung auf typischerweise 1-3 m in horizontaler Richtung durch die Übertragung von Differenzialkorrekturen.

Weitere detaillierte Informationen über EGNOS sind in [ESA 2006a] zu finden.

#### 4.6.4.2 Wide Area Augmentation System

Das Wide Area Augmentation System (WAAS) ist ein System, in dem geostationäre Satelliten dem GPS-Empfänger ein Korrektursignal zur Verfügung stellen. Es wurde von der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA für hohe Genauigkeit bei Landeanflügen in den USA entwickelt, da GPS allein nicht in der Lage war, die Forderungen der Luftfahrt für alle Phasen des Flugverkehrs zu erfüllen. WAAS funktioniert ausschließlich in den USA, da die entsprechenden Satellitensignale nur dort gültig sind.



#### **4.6.4.3 MTSAT Based Augmentation System**

MTSAT (Multi-Functional Transport Satellite) Satellite-based Augmentation System (MSAS) ist das Wide Area Augmentation System für GPS. Die Satelliten übertragen Korrektur- und Integritätsdaten für die Fläche der japanischen Region. Das System wird von der meteorologischen Behörde und dem japanischen Ministerium für Infrastruktur und Transport betrieben. MTSAT kombiniert meteorologische und Kommunikationsdienste. Flugzeuge können sich auf die effiziente Navigation durch den Empfang von GPS-Signalen und MSAS-Augmentation-Informationen jederzeit und in jeder Phase des Fluges verlassen.

### ***4.7 Startmodi eines GNSS-Empfängers und ihre unterschiedlichen Ursachen***

GNSS-Empfänger weisen im Allgemeinen vier Startmodi auf und zwar Factorystart, Warmstart, Kaltstart und Hotstart. Jeder Startmodus hängt stark von der Qualität und Verfügbarkeit des Empfangssignals ab (siehe Tabelle 4-4). Ein wichtiges Kriterium für die Bezeichnung der verschiedenen Startmodi ist die Time to First Fix (TTFF). Die TTFF bezeichnet die Zeit, die ein GNSS-Empfänger benötigt, bis er nach dem Einschalten zum ersten Mal seine Position bestimmen kann. Die Dauer der Ladevorgänge des GNSS-Empfängers ist natürlich von den allgemeinen Empfangsbedingungen abhängig. Die Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung hängt außerdem vom Zeitpunkt des letzten Betriebs des Empfängers ab [Djike 2007].

Diese Ladezeiten (vollständiger Empfang aller relevanten Daten) können durch die Benutzung von A-GPS reduziert werden, da hier die Daten über einen getrennten Kanal (z.B. Mobilfunk) schneller und unabhängig von eventuellen Satellitenabschattungen übertragen werden [Kaplan, Hegarty 2006; Bazant et al. 2008].

#### **4.7.1 Factorystart**

Unter Factorystart versteht man das erstmalige Einschalten des Geräts (z.B. nach mehr als 6-monatigen Betriebspausen). In diesem Fall müssen die Ephemeriden-Daten vollständig eingelesen werden [Kaplan, Hegarty 2006].

#### **4.7.2 Warmstart und Hotstart**

War der GPS-Empfänger vor kurzem eingeschaltet und sind die Ephemeriden-Daten noch teilweise oder vollständig gültig, spricht man von einem Warm- bzw. Hotstart. Der Hauptunterschied zwischen Warm- und Hotstart ist, dass bei Hotstart sowohl die Ephemeriden- als auch die Almanach-Daten noch vollständig im GNSS Empfänger vorhanden sind. Beim Warmstart sind die Ephemeriden nur teilweise gültig [Kaplan, Hegarty 2006].

#### **4.7.3 Kaltstart**

Kaltstart bedeutet, dass zwar die Almanach-Daten vollständig und gültig sind, aber die Ephemeriden-Daten neu geladen werden müssen [Kaplan, Hegarty 2006].

**Tabelle 4-4 Übersicht über die verfügbaren Informationen im GNSS Empfänger für verschieden Startmodi**

Startmodus	Verfügbare Information im GNSS Empfänger			
	Geschätzte Position	Geschätzte Zeit	Aktuelle Almanach-Daten	Aktuelle Ephemeriden-Daten
Kaltstart	nein	nein	nein	nein
Warmstart	ja	ja	ja	nein
Hotstart	ja	ja	ja	ja

## 4.8 Analyse der GNSS Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen im bodengebundenen Verkehr spielen eine sehr wichtige Rolle in bezug auf die Empfangsqualität in der satellitengestützten Navigation. Diese Umgebungsbedingungen sind von großer Bedeutung für die Startmodi des GNSS-Empfängers [Dobos et al. 2002]. Im folgenden Abschnitt wird jeder Startmodus eines Empfängers erläutert. Im Anschluss daran werden die wichtigsten Faktoren für die Verfügbarkeit des Systems in einer Umgebung und ihre Einflüsse auf die Positionsermittlung eines Objekts dargestellt und ausführlich beschrieben [Van den Berg, Dieleman 2002; Filip et al. 2008].

### 4.8.1 Grundprinzipienbeschreibung von Wellenausbreitung in Bezug auf GNSS

Wellen als Form einer zeitlich nicht konstanten Energieausbreitung mit gleichem zeit- und ortsabhängigem Verlauf [Käs, Pauli 1991] weisen unterschiedliche Eigenschaften auf, die sowohl zu erwünschten als auch zu nachteiligen Effekten für technische Anwendungen führen können.

Als Grundlage für alle Formen elektromagnetischer Wellen gelten die Maxwell'schen Gleichungen, die in einen Frequenzbereich von ca. 100 Hz bis zu  $10^{24}$  Hz gelten. Alle Wellen dieser Art sind transversal und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist im Vakuum gleich der Lichtgeschwindigkeit [Kaplan, Hegarty 2006].

Eine solche periodische ausbreitende Welle ist durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$ , Frequenz  $f$  und die Wellenlänge  $\lambda$  definiert [Grimsehl 1985]:

$$v = \lambda \times f \quad (4-3)$$

Elektromagnetische Wellen bestehen sowohl aus elektrischen als auch magnetischen Wellen. Diese beiden Komponenten stehen orthogonal aufeinander und auch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung [Karamanolis 1996].

#### 4.8.1.1 Wellenausbreitungseigenschaften

Wellenausbreitung findet in den unterschiedlichsten Medien (Luft, Wasser, Vakuum usw.) statt. Diese Medien werden charakterisiert durch die Permittivitätszahl, die Permeabilitätszahl und die Leitfähigkeit [Lorrain et al. 1995]. Als Medien dienen Dielektrika (magnetische oder nichtmagnetische Leiter), gute Leiter, Vakuum und ionisierte Gase. Der gesamte Bereich der Funktechnik geht davon aus, dass elektromagnetische Strahlung Wellencharakter besitzt. Aus

dieser Sicht lassen sich viele Eigenschaften eindeutig beschreiben. Diese Eigenschaften sind insbesondere Reflexion, Brechung, Beugung, Interferenz, Absorption (Ausbreitungsdämpfung) und Polarisationsänderung. Die Eigenschaften der Wellen sind in [Wildt 2006] ausführlich behandelt. Diese Eigenschaften der Wellen sind im Zusammenhang mit Mehrwegeausbreitung und der Atmosphärischen Effekte bei GNSS-gestützter Positionsbestimmung von großer Bedeutung und werden deshalb später näher betrachtet.

#### **4.8.1.2 Atmosphärische Effekte bei Satellitenmessungen**

Aufgrund der großen Entfernung zwischen Satelliten und Nutzern, relativ zu den Empfangsantennenausmaßen, kann das GNSS-Signal als ebene Welle betrachtet werden. Bei ebenen Wellen bilden alle gleichartigen Wellenzustände eine Ebene, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung liegt [Karamanolis 1996]. Die praktische Bedeutung ebener Wellen besteht darin, dass mit zunehmender Ebenheit auch der Wirkungsgrad der Antennen steigt [Prinz 2006].

Zwei Bereiche der Atmosphäre sind wichtig für die Ausbreitung von GNSS Signalen [Grewal et al. 2001; Karamanolis 1996; Mansfeld 2006].

- Die Troposphäre ist der neutrale Teil der Atmosphäre mit einer Ausdehnung vom Erdboden bis in ca. 10 km Höhe. In diesem Teil der Atmosphäre ist die Verzögerung der GNSS-Signale nicht dispersiv, d.h. frequenzunabhängig.
- Die Ionosphäre besteht aus geladenen Ionen und Elektronen und erstreckt sich von etwa 50 bis 1000 km Höhe. Die Ionosphäre ist für GNSS-Signale dispersiv. d. h., die Signale der beiden GPS-Frequenzen werden unterschiedlich beeinflusst.

Von diesen beiden Teilen der Atmosphäre treten die meisten Veränderungen des Signals in der Ionosphäre auf [Grewal et al. 2001].

Mit der Zeit verändert sich die Intensität der Sonnenstrahlung. Bekannt ist insbesondere der 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne, der sich mit einer periodischen Änderung der Sonnenfleckensstruktur äußert. Bei der maximalen Beeinflussung durch diesen Zyklus können die Auswirkungen der Ionosphäre auf einen GNSS-Empfänger so stark sein, dass die Satellitensignale nicht mehr richtig verarbeitet werden. Ionosphärische Störungen treten besonders häufig in äquatornahen Zonen (hohe Elektronendichte) und bei den Polkappen (starke kurzzeitige Variationen) auf [Mansfeld 1998].

Zudem gibt es ionosphärische Stürme, Ereignisse mit enormen Änderungen der Elektronendichte, die meist mit großen Sonneneruptionen gekoppelt sind. Solche ionosphärischen Stürme stören nicht nur GNSS-Signale sondern auch Funkverbindungen, Telekommunikation per Satellit etc., und können sogar bis zum Zusammenbruch von Überland-Hochspannungsnetzen führen [Grewal et al. 2001].

Die Distanzverfälschung, die durch die Ionosphäre verursacht wurden, sind durch die Korrelation mehrerer Satellitensignale leicht zu korrigieren [Mansfeld 1998; Kowoma 2007].

Die ionosphärischen Effekte sind nicht die einzigen Ursachen für Positionsfehler. Auch Mehrwegeausbreitungen, die die Pseudoentfernungen des Satelliten verfälschen, haben einen Einfluss auf eine Positionsbestimmung [Kaplan, Hegarty 2006].

### 4.8.1.3 Mehrwegeausbreitungen bei Satellitenmessungen

Die Ursache für den Effekt der Mehrwegeausbreitung liegt im gewählten Verfahren für das Satellitenmesssystem. Um eine unbegrenzte Anzahl von Nutzern zuzulassen, müssen die Satelliteninformationen omnidirektional ausgestrahlt werden. Somit trifft auf allen Oberflächen nahezu die gleiche Energie auf wie an der Empfangsantenne selbst. Wird diese Energie infolge der Oberflächeneigenschaften zur Antenne hin abgelenkt oder zurückgeworfen, treffen somit mehr Informationen ein als erwünscht. Durch Mehrwegeeffekte sind sowohl Code- als auch Trägerphasenmessungen beeinflusst. Code-Mehrwegeeffekte liegen im Bereich von dm-m und sind damit etwa 2 Zehnerpotenzen stärker als Trägerphaseneffekte (mm-cm) [Misra, Enge 2001].

Es ist schwierig für ein System, zwischen direkten und indirekten Signalen zu unterscheiden. Erste Schritte sind hier vor allem bei der Verringerung bzw. Eliminierung der Code-Mehrwegeausbreitungseinflüsse vorgenommen worden [Van Nee et al. 1994].

Mobile Empfänger sind neben möglichen Reflexionen am Fahrzeug selbst vor allem hochfrequenter Mehrwegeausbreitung von Umgebung ausgesetzt. Alle statischen Verfahren weisen Effekte geringerer Frequenz auf. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, in welchem Abstand von der Antenne sich der Reflektor befindet. Langwellige Effekte treten dann auf, wenn der Abstand Reflektor zu Antenne sehr gering ist. Es genügt dann auch eine relativ kleine Fläche, um starke Mehrwegesignale zu erzeugen.

Bei Mehrwegeeffekten braucht das reflektierte Signal länger, um zum Empfänger zu gelangen, als das direkt empfangene Signal (siehe Abbildung 4-13).

Neben der Reflexion in der Nähe der Empfänger sind auch Reflexionen auf dem Satelliten selbst denkbar [Young et al. 1985]. Sie wirken auf beiden Endpunkten einer Basislinie in gleicher Art und Weise, wenn die Basislinienlänge die üblichen Entfernungen der Landesvermessung nicht wesentlich überschreitet. Diese Effekte haben kaum praktische Bedeutung, da sie bei der Differenzbildung herausfallen.

Mehrwegeeffekte bei GNSS-Systemen gehören zu einer Reihe typischer GNSS-Fehlergrößen. Ein Teil dieser Fehler lässt sich durch relative Positionsbestimmung reduzieren bzw. eliminieren. Es besteht eine Abhängigkeit der Größe der Fehler von der Basislinienlänge. Davon ausgenommen sind Mehrwegeeffekte und Einflüsse des Antennenphasenzentrums. Diese wirken rein stationsabhängig.

Es gibt einige Methoden für die Berechnung der Umweglänge, die durch Mehrwegeausbreitungen verursacht werden [Leick 1995] und [Becker, Thiel 1995].

## 4.8.2 Relevante Faktoren für die Verfügbarkeit des GNSS-Systems in einer Umgebung

Die Verfügbarkeit ist abhängig von den physikalischen Eigenschaften der Umgebung, der Verfügbarkeit des Signals und den technischen Leistungsparametern der Signalübertragung [Beugin et al. 2008; EUROCAE 2006].

Die Quellen der Positionsungenauigkeit sind meist auf eine schlechte Schätzung der Pseudodistanz zwischen dem Satelliten und dem Empfänger zurückzuführen. Diese werden durch

eine ungenaue Messung der Übertragungszeit verursacht. Einfluss haben:

- Art der geometrischen Disposition der Satelliten,
- Übertragungsphänomene (ionosphärische Phänomene, Mehrwegeausbreitung, troposphärische Phänomene),
- Fehler von Ephemeridendaten oder an der Zeitssynchronisierung der Uhren,
- Fehler des Empfängers.

### **4.8.3 Der atmosphärische Effekt**

Während des Laufwegs zwischen dem Satelliten und dem Empfänger werden die Signale in der Ionosphäre (Höhe zwischen 70 und 2000 km) und der Troposphäre (Höhe von 0 bis 10 km) beeinflusst.

In der Tat sind die verschiedenen Schichten der Atmosphäre (Ionosphäre, Troposphäre und Stratosphäre) die Zonen, wo die Übertragungszeit und der Laufweg des Signals beeinträchtigt werden. In der Praxis kann eine ionosphärische Korrektur durch die gemeinsame Nutzung mehrerer Übertragungsfrequenzen abgeschätzt werden. Es gibt viele Modelle für die troposphärische Korrektur, diese sind abhängig von den Parametern, wie dem Elevationswinkel des Satelliten, der Temperatur oder dem Druck der Atmosphäre. Solch ein Modell ist in [Spilker 1996] erläutert. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur die unmittelbare Umgebung im bodengebundenen Verkehr betrachtet.

### **4.8.4 Fehlerquellen und ihr Einfluss auf die Positionsbestimmung**

Die Phänomene, die die Genauigkeit der Positionsbestimmung beeinträchtigen, sind bekannt und haben die verschiedensten Ursachen. Der Gesamtfehler, der bei einer Pseudoentfernungsmessung entsteht, setzt sich aus verschiedenen Fehlern zusammen:

- Fehler, die durch das Raumsegment (Satelliten) entstehen. Dabei handelt es sich insbesondere um die Uhrenfehler der Satelliten und die Bestimmung der genauen Position der Satelliten in ihren Bahnen (Ephemeriden). Um diesen Fehlern entgegenzuwirken, werden die exakten Bahndaten ständig von dem Kontrollsegment kontrolliert, korrigiert und mit den Ephemeridendaten zum Empfänger übertragen [Jacobsen 2003].
- Fehler, die durch die Signalausbreitung entstehen. Die Signale vom Satelliten zum Empfänger verlangsamen sich beim Durchqueren von Ionosphäre und Troposphäre. Zur Korrektur dieser Fehler werden geeignete Modelle verwendet. Der Fehleranteil wird auch durch Mehrwegeausbreitung erhöht. Das Signal, das an einem Gebäude oder anderen Hindernissen reflektiert wird, erreicht den Empfänger erst zu einem späteren Zeitpunkt als das Signal, das auf direktem Weg vom Satelliten zum Empfänger gelangt. Die Signale, die mit einem niedrigen Elevationswinkel vom Satelliten ausgehen, verursachen die meisten Fehler dieser Art (Mehrwegeeffekt).
- Fehler, die durch den GALILEO-Empfänger verursacht werden. Zu den Ursachen dieser Fehler gehören die im Vergleich zu den Atomuhren der Satelliten weniger genauen Quarzuhren der Empfänger. So entsteht zum Beispiel der Empfängeruhrenfeh-

ler aufgrund von Zeitabweichungen der entsprechenden Uhr gegenüber der GALILEO-Systemzeit. Auch die internen Störungen des Empfängergeräts führen zu Fehlern in der Berechnung.

Diese Fehler werden zusammengefasst als User Equivalent Range Error Budget (UERE) bezeichnet [Ruiz 2003]. Die meisten dieser Fehler können durch geeignete Maßnahmen eliminiert oder verringert werden. Die UERE-Fehler und ihre Einflussgrößen sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst. Die Werte dieser Tabelle stammen aus einer Studie von Luis Ruiz (Entreprise Commune GALILEO Bruxelles) aus dem Jahr 2003 und sind für Elevationswinkel von 30 bis 40 Grad definiert [Ruiz 2003].

In der Realität ist die Problemlage allerdings noch komplizierter, da das System nicht stationär ist. Die Satelliten und der Empfänger bewegen sich, und diese Bewegungen sollten bei den Messungen ebenfalls berücksichtigt werden. Die Satellitengeometrie, die als Dilution of Precision oder DOP bezeichnet wird, spielt für die Güte einer Positionsbestimmung eine erhebliche Rolle.

**Tabelle 4-5 GALILEO- User Equivalent Range Error Budget (UERE) [Ruiz 2003]**

User Equivalent Range Error Budget (UERE) (Dual-Frequency Receiver)	
Zeitsynchronisation & Ephemeridenfehler	0,65 m
Troposphäre & Ionosphäre	0,25 m
Mehrwegeausbreitung	0,2 m
Empfängerfehler	0,2 m

### 4.8.5 Geometrische Disposition des Satelliten

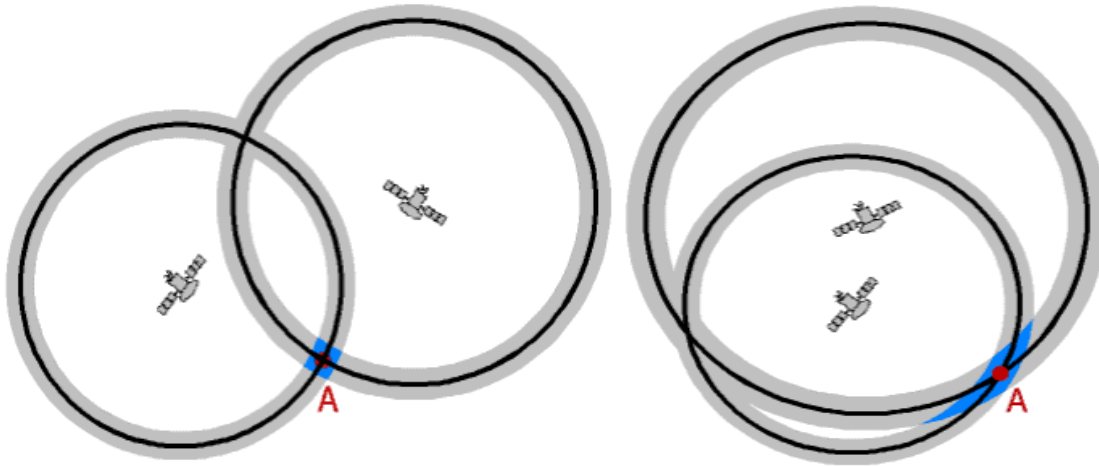
Nicht jede Satellitenkonstellation erlaubt eine optimale Auswertung der Signale für die Berechnung der Position eines Empfängers. Wenn einzelne Satelliten innerhalb einer Satellitengruppe zu eng beieinander sind, verschlechtert sich die Genauigkeit der Berechnung.

Die „ideale“ Raumverteilung der Satelliten, die für die Positionsberechnung benutzt wurden, wäre der entfernte Schnittpunkt von einem gleichseitigen Viereck. Eine Veranschaulichung dieses Konzepts ist in Abbildung 4-10 zu finden. Eigentlich illustriert die linke Abbildung ein Szenario, in dem zwei Satelliten ungefähr im Rechteck hinsichtlich der Position des Benutzers sind. Die blaue Unsicherheitszone betrifft die möglichen Fehler bei der Messung der Pseudodistanz, welche viel kleiner ist als die auf der rechten Seite, die ein Szenario illustriert, in dem die zwei Satelliten nah sind.

Die Güte einer Konstellation wird mit dem Begriff Dilution of Precision (DOP) beschrieben, was wörtlich übersetzt soviel wie Auflösung oder Abschwächung der Genauigkeit bedeutet [Prinz 2006]. Es gibt verschiedene Arten der DOP-Bezeichnungen [Zogg 2006b]:

- GDOP: Geometrische-DOP (geometrische Genauigkeit in Position und Zeit; vierdimensional)
- PDOP: Positions-DOP (Position im Raum; dreidimensional)
- HDOP: Horizontales-DOP (Position in der Ebene; zweidimensional)
- VDOP: Vertikales-DOP (nur Höhe; zweidimensional)

- TDOP: Zeitgenauigkeit für die Betrachtung des Uhrzeitfehlers



**Abbildung 4-10 Fehler verursacht durch die Geometrie des Systems [Kowoma 2007]**

Wie bereits erwähnt (siehe Abschnitt 4.8.4), hängt die Genauigkeit der Positionsbestimmung von der UERE (Standardabweichung der einzelnen Pseudodistanz- oder Entfernungsfehler) und der geometrischen Konfiguration der benutzten Satelliten, ausgedrückt durch die Skalagröße DOP, ab. Der Zusammenhang zwischen diesen Parametern wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt.

$$\text{Positionsfehler} = \text{DOP} \times \sum \text{Entfernungsfehler (UERE)} \quad (4-4)$$

Nach dieser Gleichung sollten die DOP-Werte für eine günstige Genauigkeit sehr niedrig sein. Eine gleichmäßige Verteilung der sichtbaren Satelliten über den gesamten Himmel wäre demnach ideal für eine genaue Positionsbestimmung [Rothacher 2007].

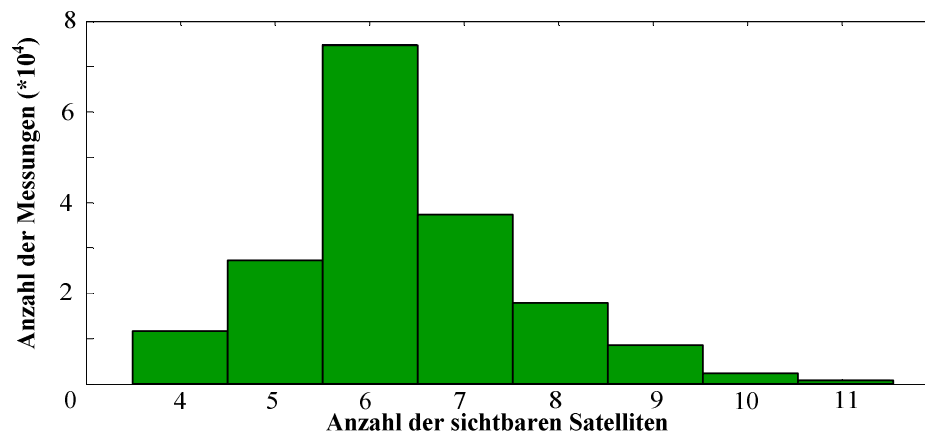
Anschaulich betrachtet lässt sich zeigen, dass der GDOP-Faktor umgekehrt proportional zum Volumen eines Tetrahedrons ist, das von den vier Satelliten (falls vier Satelliten für die Lokalisierung in Betracht kommen) und dem Empfänger gebildet wird. Das bedeutet, dass der GDOP-Faktor umso kleiner und die Position dadurch umso besser wird, je größer dieser Tetrahedron ist [Schildt 2008; Marais et al. 2003]. Es handelt sich um einen Faktor, der bei Qualifizierung der GNSS basierten Anwendungen zu berücksichtigen ist.

Die Gleichung (4-4) ermöglicht eine Evaluation der Genauigkeit des GALILEO-Systems, wobei die Entfernungsfehler auf der Pseudodistanz basieren. Die Mehrzahl der derzeitigen Empfänger benutzt eine Höchstanzahl von Satelliten, sobald diese ein ausreichendes Signalniveau erreicht haben. Der Wert des GDOP wird aus der Linearisierung des Gleichungssystems extrahiert, das in der Positionsberechnung benutzt wurde. Die konkreten Berechnungsschritte sind im [Yarlagadda et al. 1997] zu finden.

#### 4.8.5.1 Anzahl der verfügbaren Satelliten über der Zeit

Die GNSS-Satelliten haben kreisförmige Umlaufbahnen so dass ihre Positionen mit der Zeit variieren. In der Praxis werden 6 Satelliten wenigstens über 5 Grad Neigungswinkel in mehr als 70% der Zeit für das GNSS sichtbar sein [Rothacher 2007].

In Abbildung 4-11 ist eine histogrammatische Darstellung der Anzahl der verfügbaren empfangenen Satelliten in 24 Stunden (ca. 177 000 Messungen/ Tag, iVA Gebäude, Braunschweig) zu sehen. In dieser Messung hat die GNSS-Positionsverfügbarkeit den Wert 99,37 % erreicht, was auch den Erwartungen entspricht.



**Abbildung 4-11 Histogrammatische Darstellung der sichtbaren Satelliten für eine statische Messung**

#### **4.8.5.2 Einfluss der Anzahl der sichtbaren Satelliten auf die Genauigkeit bei der Positionsbestimmung**

Die Anzahl der verfügbaren Satelliten beeinflusst die Positionsgenauigkeit. Tatsache ist, dass die Genauigkeitskoeffizienten wie die PDOP direkt mit der Anzahl der Satelliten im Zusammenhang stehen (siehe Abbildung 8-3). Wie bei der GDOP steigt die Genauigkeit der Lokalisierung, wenn die HDOP zurückgeht. Mit einer größeren Anzahl von verfügbaren Satelliten kann der GNSS Empfänger die bessere geometrische Konfiguration für eine bessere Genauigkeitsberechnung wählen. Allgemein kann man sagen, je größer die Anzahl der verfügbaren Satelliten wird, desto besser wird die erreichte Positionsgenauigkeit.

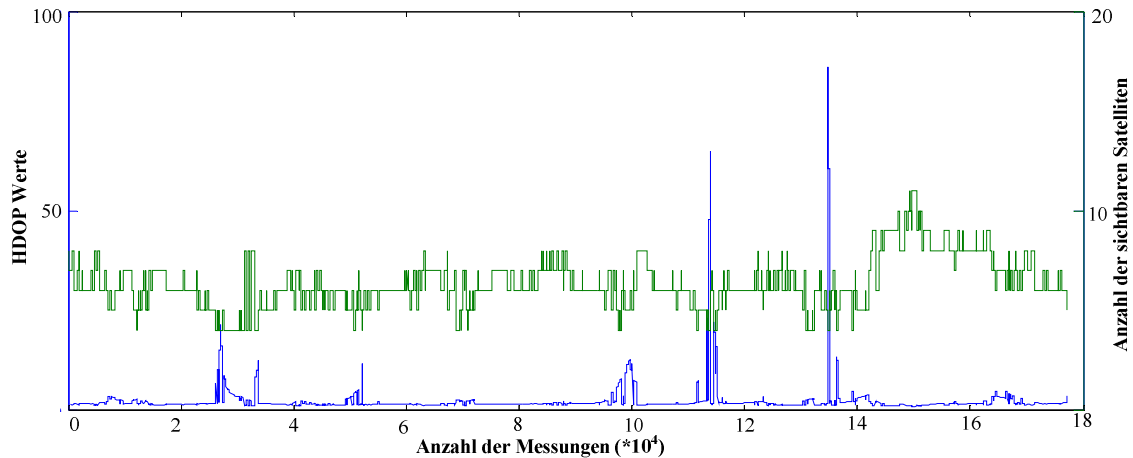
Bei der exemplarischen Berechnung von 127000 statischen Messungen hat der Korrelationskoeffizient, zwischen Anzahl der sichtbaren Satelliten und HDOP, den Wert 0,804 erreicht. Dies bestätigt die oben genannte Hypothese, dass ein relevanter Zusammenhang zwischen den HDOP-Wert und der Anzahl der sichtbaren Satelliten bei statischer Messung zu erkennen ist.

#### **4.8.5.3 Einfluss der Abschattung**

Der ideale Fall im Sinne der Qualität des empfangenen Signals ist der Fall, in dem die elektromagnetische Welle direkt empfangen wird (ohne Mehrwegeausbreitung). Die Sender-Empfängersstrecke entspricht der direkten Sichtbarkeitslinie. Es wird dann keine Verzögerung geben, die auf Mehrwegeausbreitungen des Signals zurückzuführen sind, und die Signalabschwächungen sind nur durch die atmosphärischen Effekte im freien Raum (Path loss) verursacht. Die Horizontlinie im Sinne einer direkten Sichtbarkeitslinie zwischen dem Sender und dem Empfänger wird in Abbildung 4-13 dargestellt (grüne Linie).

In urbanen Agglomerationen kann die optische Horizontlinie, wegen der Anwesenheit von Hochgebäuden und Hindernissen, einen hohen Elevationswinkel erreichen. Dann ist dies einer der Hauptfaktoren die Abschattung, die bei Positionsbestimmung durch GNSS in solcher Umgebung regelmäßig auftritt.





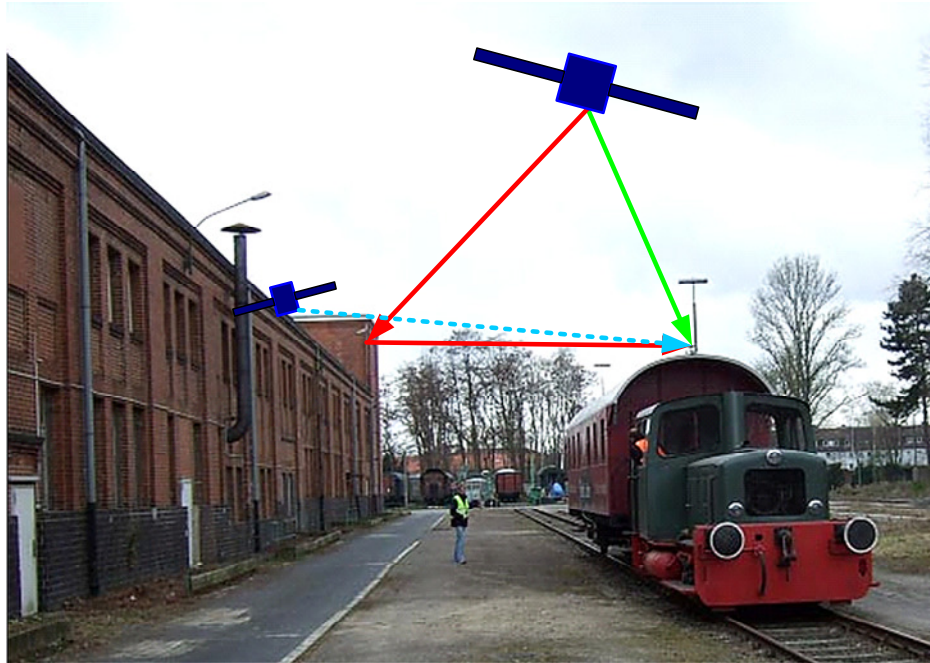
**Abbildung 4-12 Variation des HDOP (blau) in Abhängigkeit der sichtbaren Satelliten (grün)**

In solcher Umgebung ist die Verfügbarkeit von Informationen zur Lokalisierung nicht garantiert. Allerdings wird die Mindestzahl von vier Satelliten, die für die Triangulation benötigt wird, nicht immer erreicht [OSTAN 2001]. In der Abbildung 4-12 wird die Änderung der Anzahl der Satelliten während einer Fahrt dargestellt. Die erreichte Verfügbarkeit von den GNSS (mindestens 4 Satelliten) während der Testfahrt (4.6.2008) lag bei 87.48 %.

Es sind sehr leicht zwei kritische Bereiche (bei 11600 und 13700) zu erkennen. Bei diesen handelt sich um Bereiche, wo die Umgebungsbedingungen sehr kritisch waren. Die teilweise sehr große HDOP Wert ist auf die Abschattung der GNSS-Signale zurückzuführen. Diese lokale Eigenschaft des HDOP Wertes ändert sich während der Fahrt bedeutend (das Maximum liegt bei 86), obwohl der Mittelwert für diese konkrete Messung 2,0 beträgt. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei der Analyse weiteren 6 Fahrten erreicht.

#### 4.8.5.4 Mehrwegeausbreitung

Zu den Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen (siehe Abschnitt 4.8.1) gehören Reflektionen und Beugungen, die wiederum verantwortlich für Mehrwegeausbreitung sind. Mehrwegeausbreitungen sind eine der Hauptfehlerquellen bei GNSS-Messungen [Thaller 1999]. Speziell durch Mehrwegeeffekte sind vor allem Parameter wie Polarisierung, Laufzeit, Phase und Signalstärke betroffen. Hier besteht eine deutliche Abhängigkeit vom Antennenstandort (Geometrie, elektrische Eigenschaften und Oberflächenrauheit) [Eissfeller 1997]. In Abbildung 4-13 ist ein Beispiel zur Mehrwegeausbreitung dargestellt (rote Linie). Die Größenordnung der Fehler, die durch Mehrwegeausbreitungen verursacht werden, ist proportional zur Länge des Chipcodes für die Messungen der Pseudoentfernungen. Weitere konkrete Informationen sind in der Literatur [Wildt 2006] zu finden.



**Abbildung 4-13 Grundprinzip der Mehrwegeausbreitung (rote Linie), direkte Sicht (blaue und grüne Linie)**

#### **4.8.6 Erfassung der GNSS-Umgebung**

Der erste Schritt für die Betrachtung und Beurteilung der Merkmale des GNSS-Empfängers ist die korrekte Erfassung der Umgebung, da diese eine entscheidende Rolle für die Positionsberechnung spielt. Für eine dreidimensionale Rekonstruktion der Umgebung sind unterschiedliche Methoden bekannt, wie z.B. die Fotogrammetrie, die Laserscanning-Methode usw. [Marais et al. 2003; Marais 2002].

### **4.9 Verfügbarkeit und Genauigkeit der GALILEO SoL Dienst**

Die Hauptaufgabe oder das Hauptziel eines GNSS ist, dem Nutzer Informationen für die Ortung zur Verfügung zu stellen. Hierbei spielen Genauigkeit und Verfügbarkeit eine bedeutsame Rolle.

In den folgenden Unterabschnitten werden die Leistungsparameter von GNSS kurz beschrieben und im speziellen Fall die Merkmale und Anforderungen des sicherheitskritischen GALILEO Dienstes „SoL-Service“ (siehe Abschnitt 4.9.9) dargestellt. Die Leistungsparameter von Navigationssystemen können über die Merkmale wie Genauigkeit, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Kontinuität und Integrität definiert werden, die wiederum durch einzelne Merkmale und Größen beschrieben werden.

#### **4.9.1 Genauigkeit (engl.: Accuracy)**

Die Genauigkeit einer GNSS-Position ist definiert als die Abweichung von der wahren Position, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% zu jedem Zeitpunkt und an jeder mögli-

chen Stelle in der betroffenen Reichweite nicht überschritten wird. In einem Navigationssystem ist die Genauigkeit ein statistischer Wert, der den Grad der Übereinstimmung zwischen der gemessenen GNSS Position und Zeit und der wahren, d.h. tatsächlichen Position und Zeit beschreibt [Tiemeyer 2001; ESA 2002b; Fuhlbrügge 2004].

## 4.9.2 Integrität (engl.: Integrity)

Integrität ist die Fähigkeit eines Navigationssystems, dem Nutzer innerhalb einer bestimmten Zeitspanne eine Information darüber zu übermitteln, dass das Navigationssystem nicht zur Navigation verwendet werden soll [ESA 2002b, ESA 2007, ESA 2005a].

Die Integritätsinformation von GALILEO wird von dem GSS (GALILEO Sensor Stations)-Netzwerk berechnet. Dieses Netzwerk überwacht die Navigationsinformationen, die von allen GALILEO-Satelliten ausgesendet werden. Folgenden Daten bzw. Überprüfungsmeldungen bilden die Integritätsinformation [Mansfeld 2006]:

- Meldung über die Verfügbarkeit fehlerfreier Satellitensignale (Signal In Space Accuracy, abgekürzt SISA)
- Information über den Zustand aller GALILEO-Satelliten
- Meldung der geschätzten Unsicherheit der gemessenen Entfernung zum Satelliten

Mit den bekannten Positionen der GSS kann die aktuelle Position der SV (Space Vehicle: „Satellit“) bestimmt werden. Diese ist jedoch mit Fehlern behaftet. Die SISE (Signal In Space Error) beschreibt die Differenz zwischen der wahren SV-Position und der Vorhersage der Position, die mit dem Navigationssignal übertragen wird. Es handelt sich dabei um eine Schätzung, da die exakte Position der Satelliten unbekannt ist [ESA 2005b].

Das GALILEO-System sendet folgende Integritätsmerkmale:

- SISE (Signal In Space Error)
- eSISE (estimated SISE): Da SISE nicht direkt gemessen werden kann, muss es vom Bodensegment berechnet werden.
- SISA (Signal In Space Accuracy): Vorhersage der minimalen Standardabweichung einer Gauß-Verteilung, welche die Verteilungen der SISE aller möglichen Nutzerpositionen im Sichtbarkeitsbereich des Satelliten für den Fall, dass keine systematischen Fehler auftreten, einschließt. Im Englischen wird diese Vorhersage als overbounded bezeichnet.
- SISMA (Signal In Space Monitoring Accuracy): Schätzung der minimalen Standardabweichung einer Gauß-Verteilung, welche die Differenz der SISE und der eSISE einschließt.
- IF, TH (Integrity Flag and Integrity Flag Threshold): Das Integrity Flag eines Satelliten wird immer dann auf Alarm gesetzt, wenn der maximale Fehler in Bezug auf die Entfernung zwischen Satellit und Nutzer einen vordefinierten Schwellwert (TH) übersteigt. Wenn also die maximale eSISE grösser ist als die Integrity Flag Threshold, wird vom Satelliten die Meldung „not ok“ oder „don't use“ gesendet. Mögliche Werte des IF sind „ok“, „not ok“ und „not monitored“ [ESA 2005b].

Nur die Daten zur Integrität von SISA, SISMA, TH und IF werden im Nutzersegment gesendet. Die Übertragung der SISE als Bestandteil der Navigationsinformation ist aufgrund der Größe der Information unmöglich. Unter Berücksichtigung all dieser Informationen kann der GNSS-Empfänger das Integritätsrisiko für die Schätzung der Position an der Alarmgrenze (AL) berechnen. Diese Berechnung berücksichtigt die Tatsache, dass ein verfügbares Signal zur Bestimmung der Position eines Benutzers mit Fehlern behaftet sein kann, die bei der statistischen Schätzung des SISE verursacht wurden. Das berechnete Integritätsrisiko ermöglicht schließlich die Identifizierung des Ausfalls des Dienstes oder der Verfügbarkeit des Positionsbestimmungsdienstes.

### **4.9.3 Kontinuität (engl.: Continuity)**

Kontinuität ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Benutzer in der Lage ist, seine Position mit der erforderlichen Genauigkeit und Integrität an jeder möglichen Stelle in dem betreffenden Gebiet während einer vorgesehenen Nutzungsdauer festzustellen [Tiemeyer 2001]. Das Kontinuitätsrisiko drückt die Möglichkeit aus, dass die Bedingung der Kontinuität nicht erfüllt ist [ESA 2002b].

### **4.9.4 Verfügbarkeit (engl.: Availability)**

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Benutzer in der Lage ist, seine Position mit der erforderlichen Genauigkeit, Integrität und Kontinuität zu jedem Zeitpunkt und an jeder möglichen Stelle in der betroffenen Reichweite festzustellen [Tiemeyer 2001]. Die Verfügbarkeit von Navigationssystemen ist die Bedingung dafür, dass der Service für die Positionsbestimmung, d. h. die „Genauigkeits-Funktion“, und für die Integritätsüberwachung, die „Integritäts-Funktion“, zur Verfügung steht und liefert die erforderlichen Voraussetzungen für Genauigkeit, Integrität und Kontinuität [ESA 2002b, ESA 2003].

Für die Verfügbarkeit gelten zwei verschiedene Anforderungen:

- Verfügbarkeit der Genauigkeits-Funktion: Diese drückt aus, ob die bei dem Empfänger geschätzte Position für die vorgesehene Anwendung ausreichend ist. Verschiedene Anwendungen stellen unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit. Es kann zu unzureichender Genauigkeit bei der Positionsbestimmung kommen, wenn die Satellitennavigation nicht verfügbar ist.
- Verfügbarkeit der Integritäts-Funktion: Diese drückt aus, ob alle Funktionen der Integritätsbestimmung für die vorgesehene Anwendung zur Verfügung stehen.

Daraus folgt, dass ein System verfügbar ist, wenn sowohl die Kriterien für die Genauigkeit als auch die für die Integrität erfüllt sind.

### **4.9.5 Zuverlässigkeit (engl.: Reliability):**

Der Prozentsatz, der angibt, wie lange von einem System erwartet werden kann, dass es die beabsichtigte Funktion mit der erforderlichen Genauigkeit ausführt [Rüffert, Hemmert 2005; ESA 2002b].

Der SoL-Service (siehe Abschnitt 4.4.1) bietet in Bezug auf Genauigkeit und Verfügbarkeit die gleiche Leistung wie der OS-Service (siehe Abschnitt 4.4.1). Der SoL-Service bietet noch

dazu Integrität, was das wichtigste Unterscheidungsmerkmal zwischen den beiden Diensten ist. Folgende Parameter dienen dazu, die Funktion der Integrität nach der Definition der ICAO (International Civil Navigation Organisation) zu beschreiben.

#### **4.9.6 Alert Limit**

Alert Limit (AL) ist der maximale zulässige Fehler, bei dessen Überschreiten ein Integritätsalarm ausgelöst werden muss. Es gibt eine Alarmgrenze in der horizontalen (HAL) und in der vertikalen Ebene (VAL) [ESA 2005b].

#### **4.9.7 Time-to-Alert**

Time-to-Alert (TTA) ist die maximal zulässige Zeit zwischen dem Auftreten der Integritätsverletzung und dem Anzeigen des Alarms am Empfangsgerät [ESA 2005a].

#### **4.9.8 Integrity Risk**

Integrity Risk (IR) ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Integritätsverletzung, die einen Integritätsalarm zur Folge haben müsste, vom System nicht detektiert wird [ESA 2005a].

#### **4.9.9 Zusammenhänge zwischen den GNSS-Leistungsparametern**

Die Zuverlässigkeit ist vergleichbar mit der Kontinuität, da sie die Verfügbarkeit des Dienstangebots des Systems ohne Unterbrechung während der vorgesehenen Nutzungsdauer beschreibt. Ein System, das wenig zuverlässig ist, ist auch wenig verfügbar. Das bedeutet, dass die Verfügbarkeit abhängig von der Zuverlässigkeit ist. In gleicher Weise führt eine wiederholte Unterbrechung der Kontinuität zu einer schlechten Verfügbarkeit des Dienstes. Wenn eine Fehlfunktion innerhalb des Systems auftritt, muss diese in einer bestimmten Zeitspanne (genannt „Time-to-Alert“) detektiert werden. Diese Funktion wird als Integrität beschrieben. Die Integrität ist somit ein Ausdruck des Vertrauens in die Genauigkeit der Informationen für die Positionierung.

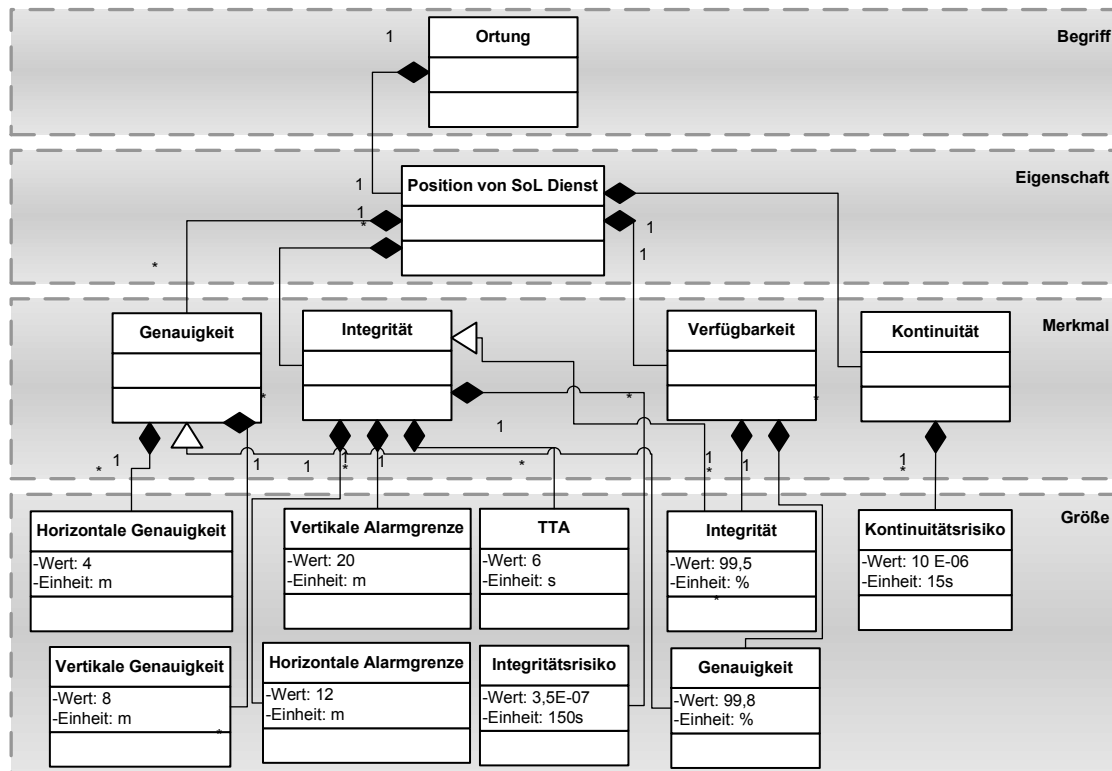


Abbildung 4-14 Bezug zwischen den Merkmalen in GALILEO SoL Dienst

Die typische Merkmale von GALILEO SoL Dienst sind in folgender Tabelle kurz dargestellt.

Tabelle 4-6 Leistungsmerkmale des GALILEO SoL-Dienstes [ESA 2002b]

		„Safety-Of-Life“-Dienst	
Empfängertyp	Träger	Drei Frequenzen (E5a+E5b+L1)	
	Integritätsberechnung	Ja	
	Korrektur der Ionosphären-Effekte	Basiert auf Zwei-Frequenz-Messungen	
Abdeckung		Global	
		Kritischer Wert	Nicht-kritischer Wert
Genauigkeit (95 % )		H: 4 m V: 8 m	H: 220 m
Integrität	Alarmgrenze (AL)	H: 12m V:20 m	H: 556 m
	Bis zum Alarm verbleibende Zeit (TTA)	6 sec	10 sec
	Integritätsrisiko (IR)	$3,5 \times 10^{-7} / 150 \text{ sec}$	$10^{-7} / \text{Stunde}$
Kontinuitätsrisiko		$10^{-5} / 15 \text{ sec}$	$10^{-4} / \text{Stunde} - 10^{-8} / \text{Stunde}$
Zertifizierung/Haftung		Ja	
Verfügbarkeit der Integrität		99,50%	
Verfügbarkeit der Genauigkeit		99,80%	

Die spezifische Kontinuität von GALILEO enthält das Kontinuitätsrisiko, dass das System entweder seine Genauigkeit (im Fall des Verlusts der Navigationsfunktion wegen eines Systemfehlers oder einer schlechten Satellitensicht) oder seine Integrität (z.B. wegen einer Überschreitung des „Alarm Limit“) verliert.

## 4.10 Leistungsfähigkeit der Satellitenortung

Es hat in den letzten Jahren bedeutende Entwicklungen im Bereich der GNSS gegeben. Trotzdem gibt es zwischen GPS und GALILEO keinen grundsätzlichen Unterschied. Durch die Kombination der GNSS wird allerdings eine bessere Satellitengeometrie erreicht. Dadurch erhöhen sich die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit und die Genauigkeit des gesamten Systems. Zusätzliche Integrität und eine bessere Abdeckung von Nord- und Südpol werden somit erreicht.

Die derzeitigen Satellitennavigationssysteme GPS und GLONASS können für zivile Anwendungen eingesetzt werden, obwohl sie ursprünglich nur für militärische Zwecke gedacht waren. Bezüglich der Integrität für sicherheitsrelevante Anwendungen sind weitergehende Systeme notwendig. An dieser Stelle kommen die GNSS Augmentation-Systeme zum Zuge.

Die Leistung, die von einem System oder einer Komponente erbracht wird, ist sein Verhalten, wie es von seinem Benutzer beobachtet wird [Lapris 1991]. Da GNSS hier als eine Ortungskomponente angesehen wird, ist der Nutzer in diesem Fall ein übergeordnetes System, das die Komponente einbindet. Das Leistungskriterium der Ortungskomponente GNSS ist die absolute Messunsicherheit der Positionsangabe unter definierter Verlässlichkeit [Grewal et al. 2001; Leinhos 1996].

Eine formale Darstellung der auf GNSS basierten Ortungsfunktion ist in Abbildung 4-15 zu entnehmen. Die umfangreiche Beschreibung der GNSS Ortungsprinzipien ist hier formal dargestellt und die Beziehungen zwischen den Merkmalen sind hier definiert. Die Trennlinie stellt die Trennung zwischen den Raumsegment und den Bodensegment des GNSS-Systems dar, wobei die Klassen Fehlerquelle und Bezugssystem in beiden Segmenten eine Rolle spielen.

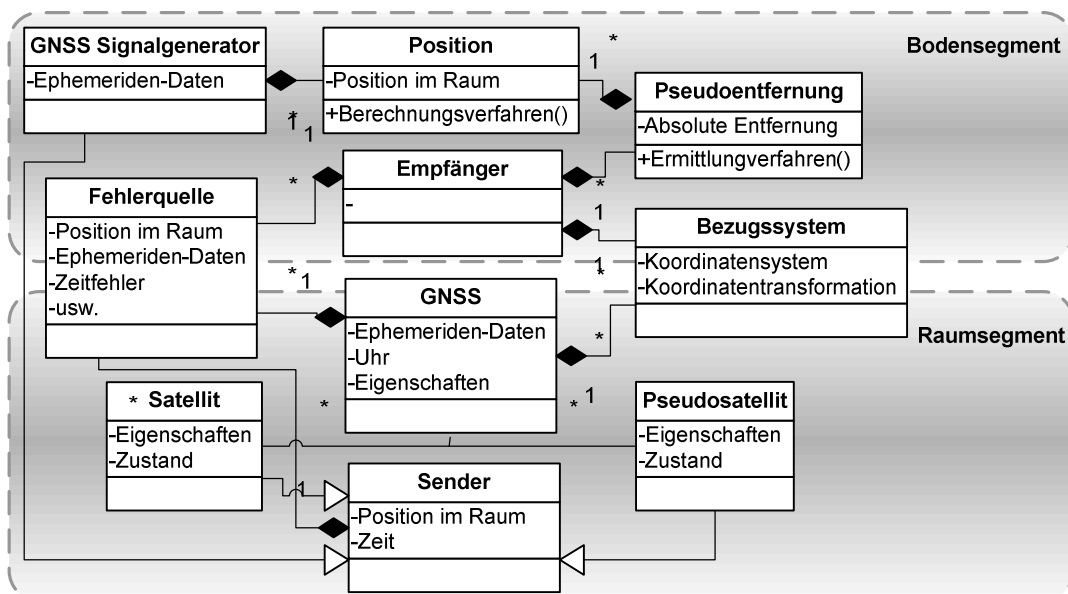


Abbildung 4-15 Formale Darstellung der GNSS basierten Ortungsfunktion als Klassendiagramm

## **4.11 Zusammenfassung**

GNSS-Systeme zeichnen sich prinzipiell durch bisher für Ortung nie da gewesene Leistungsmerkmale aus. Sie ermöglichen eine vergleichsweise preiswerte Ortung mit einer gegenüber der annähernd weltweiten Abdeckung geringen Messunsicherheit [Bazant et al. 2008]. Die Satellitenortung zeichnet sich auch durch eine enorme Langzeit- und Langstreckenstabilität aus. Auch nach 1000 km zurückgelegter Strecke oder mehreren Stunden Langsamfahrt ist die absolute Messunsicherheit dieses Systems unter Nominalbedingungen noch die gleiche [Leinhos 1996; Marais et al. 2007b; Tirtaine, Marais 2005].

Die konkrete Leistung der Satellitenortungssysteme wird bestimmt durch Anzahl und geometrische Konstellation der zur Verfügung stehenden bzw. verwendeten Satelliten (siehe Abschnitte 4.8.5.1, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6) sowie die aktuellen Signaleigenschaften jedes einzelnen Satelliten [Grewal et al. 2001; Mansfeld 1998; Marais 2002; Marais et al. 2003; Marais et al. 2007a].

Die Genauigkeit oder Zuverlässigkeit der Dienste eines GNSS ist entscheidend für die Nutzung im Verkehrsbereich. Die Konsequenzen von Fehlern in der Zuverlässigkeit des Systems können dramatisch sein. Im Hinblick auf die Positionsbestimmung bei GNSS wurden die Parameter dargestellt und erläutert, die eine genaue Positionsbestimmung beeinflussen.

Die GNSS basierten Applikationen finden immer häufiger Anwendung im Straßen- und Schienenbereich wie z.B. Navigationssysteme, Unterstützungssysteme für Flottenmanagement, Zugvollständigkeit und Stillstanderkennung im Eisenbahnbereich [Stefano 2002].



# 5 GNSS basierte fahrzeugautarke Ortung im Schienenverkehr

Derzeitige Ortungsmethoden im Schienenverkehr basieren auf streckenseitigen Installationen wie z.B. Achszählern (siehe Abschnitte 3.2.3.1, 3.3.1, 3.3.3 und 3.4.1). Derartige Systeme erlauben eine Aussage bezüglich der Position des Zuges mit einer Genauigkeit von mehreren hundert Metern. Diese Genauigkeit führt dazu, dass es zu einer suboptimalen Auslastung der Bahnstrecken kommt [Plan 2003]. Neben der geringeren Auslastung der Infrastruktur ist der Aufwand für eine Positionserfassung sehr hoch und bietet keine ausreichenden Anknüpfungspunkte an moderne und sich ändernde Anforderungen. Ein modernes Schienenverkehrssystem ist z.B. das ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System / European Train Control System). Für eine weitere Flexibilisierung des Schienenverkehrs in der Zukunft ist es erforderlich, dass man über eine fahrzeugunabhängige und kontinuierliche Ortung verfügt, die zusätzlich eine Zugintegritätsprüfung mit hoher Verfügbarkeit und Sicherheit durchführt. Ein kostengünstiges Sicherungssystem für Neben- und wenig befahrene Strecken [UIC 2005a, UIC 2006] ist ein weiterer Anwendungsbereich für ein fahrzeugseitiges Ortungssystem.

## 5.1 *Überblick über europäische Projekte*

Ein beachtliche Menge von Industrie- und Forschungsprojekten haben sich als Ziel gesetzt, die Aspekte von Technik, Migration, Wirtschaftlichkeit, Interoperabilität, Recht und Haftung zu erläutern und zu untersuchen. Im Wesentlichen kann man die Projekte in zwei technisch-betrieblichen sowie wirtschaftlich-rechtlichen Bereiche unterteilen.

Die Fragestellungen der Technik, Interoperabilität und Migration wurden in Projekten wie z.B. APOLO [Alcouffe, Barbu 2001], LOCO, GIRASOLE [Girasole 2005], GRAIL, GEO-RAIL [Barbu 2008a], GADEROS [Urech et al. 2002], RUNE, ECORAIL, LOCOPROL und LOCASY [Thomas et al. 2008], sowie nationalen Projekten wie den deutschen Vorhaben SATNAB [SATNAB 2007], RailOrt [Klinge, Röver 1997], DemoOrt, GEMINI [Hänsel et al. 2007; Filip, Suchánek 2006] primär betrachtet.

Wirtschaftlichkeit, Rechts- und Haftungsaspekte haben sich als Hauptziel Projekte wie z.B. GALILEI [EC 2003], ProDDAGE [Styles et al. 2004] und ZEUS [Hänsel et al. 2006c] genommen.

Im europäischen Raum ist zurzeit nur eine GNSS basierte fahrzeugautarke Ortung für sicherheitsrelevante Anwendung in Betrieb. Eine Pilotanwendung ist in Österreich zu finden [Stadlmann 2008]. Hier wurde ein einfaches Zugleitsystem realisiert.

Die Ergebnisse und Resultate dieser Projekte wurden in Rahmen dieser Arbeit sorgfältig analysiert und einbezogen.

## 5.2 *Projekt und System DemoOrt*

Wie schon am Anfang dieser Arbeit erwähnt, hat GNSS große Anwendungspotenziale im Bereich der Eisenbahn. Ein solches Beispiel wird hier vorgestellt. Es handelt sich hierbei um

---

ein Forschungsprojekt, dessen Teilergebnisse zeigen, dass solche Anwendungen von großem Interesse für europäische Bahnen.

Die Grundidee des Projekts DemoOrt basiert auf der Entwicklung einer Plattform mit einer fahrzeugseitigen und völlig autarken Technologie, mit dem Hauptaugenmerk auf satellitenbasierter Ortung (GPS, GLONAS, GALILEO und EGNOS).

### 5.2.1 Projektidee

Das Projekt ist Teil des BMWi Forschungsprogramms „System Schiene 2010“. Die Hauptaufgabe dieses Vorhabens ist es, ein homogenes, den Standards entsprechendes fahrzeugseitiges autarkes Positionssystem für Züge mit sicherheitsrelevantem Anwendungsbereich zu entwickeln. Hieraus ergeben sich für den globalen Markt interessante ökonomische Zusammenhänge.

Derzeitige Positionserfassungseinrichtungen im Schienenverkehr sind streckenseitig installiert. Der Gebrauch von streckenseitig installierten Einrichtungen bedingt folgende Konsequenzen:

- Hohe Wartungskosten
- Unzureichende Migrationsmöglichkeiten bezüglich Modifikationen und sich ändernder Betriebsanforderungen

Für moderne, leistungsfähige Sicherungssysteme und Betriebsverfahren, wie z.B. dem ERTMS/ETCS, wird es zunehmend erforderlich, ein System fahrzeugseitig zu implementieren und die Position kontinuierlich und exakt zu erfassen [Meyer zu Hörste 2004]. Die korrekte Funktion dieser Positionserfassung muss in einem Verifikations- und Validationsverfahren nachgewiesen werden. Die Überlegenheit von autarken Systemen liegt in der Reduzierung der Kosten und der Komplexität [Hänsel et al. 2006b].

Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt und durch ein Konsortium bearbeitet. Die Tätigkeitsverteilung wird in Tabelle 5-1 detailliert aufgeführt.

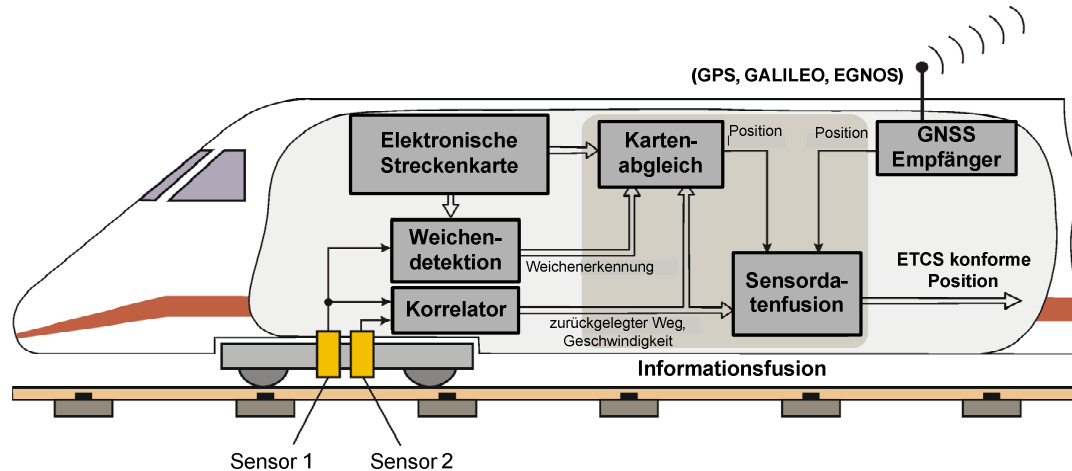
**Tabelle 5-1 DemoOrt Konsortium Überblick**

Konsortiummitglied	Status	Tätigkeiten und Verantwortlichkeiten
<b>DLR</b>	Projektleitung	Wirtschaftlichkeit -und Migrationsstrategie, Auswertungsanalyse
<b>iVA</b>	Projektpartner	GNSS-Empfänger, Referenzmesssystem, Sicherheitsbetrachtung, Testbetrieb in Poprad
<b>MRT</b>	Projektpartner	Wirbelstromsensor, Testbetrieb in Karlsruhe
<b>BT</b>	Projektpartner	Sensordatenfusion
<b>Extessy</b>	Unterauftragnehmer	Requirements tools, Streckenkartenerstellung
<b>AVG</b>	Unterauftragnehmer	Fahrzeug- und Infrastrukturbetreiber in Karlsruhe
<b>Universität Žilina</b>	Unterauftragnehmer	Fahrzeug- und Infrastrukturbetreiber in Poprad

### 5.2.2 Systemkomponenten

Die Entwurfsideen für das System beruhen auf der Forderung, dass das System hochverfügbar

ist und in Bereichen mit Sicherheitsrelevanz eingesetzt werden soll [EN 50155 2002; EN50126 2000; DIN EN 50129 2003; EC 2004]. Um diese Anforderungen zu erfüllen war es erforderlich die verschiedenen Positionsdaten zu fusionieren (siehe Abbildung 5-1) [Engelberg 2001; Geistler 2006].



**Abbildung 5-1 DemoOrt prinzipieller Aufbau [Poliak et al. 2006h]**

Der Hauptgedanke beruht auf der Idee, mehrere Sensoren zu verwenden, die auf unterschiedlichen Messprinzipien beruhen, die ein hochverfügbares und sicheres System gewährleisten sollen. Diese Messprinzipien finden sich in den nachfolgenden Komponenten wieder [Böhlinger 2008; Poliak et al. 2006b]:

- GNSS Empfänger
- Wirbelstromsensor
- Kartenabgleich

Versucht man, die Position auf der Erde mit den vier mindestens erforderlichen Satelliten zu ermitteln, kann dies Probleme bereiten, da auf der Erdoberfläche mit umgebungsbedingten Abschattungshindernissen (Bäume, Häuser etc.) gerechnet werden muss [Marais et al. 2007b; Marais et al. 2003]. Dieses Problem tritt auf, weil es zu Verschiebungen in der Laufzeit und Frequenz kommt. Wenn ein Hindernis wie z.B. ein Tunnel, die direkte Sicht zum Satelliten behindert, kann ebenfalls keine Position ermittelt werden [Poliak et al. 2006b; Bikker, Schroeder 2002]. Dieser Umstand vermindert die Verfügbarkeit satellitenbasierter Positionsermittlung in der Umgebung von Objekten, die im Bahnbereich nicht zu vermeiden sind [Bikker et al. 1999].

Allerdings ist eine hohe Verfügbarkeit gerade vor dem Hintergrund der Sicherheitsanwendungen im Bahnbereich erforderlich (z.B. für den Einsatz in Zugsicherungssystemen) [Böhlinger 2008]. Eine Einschränkung, die der Problematik behilflich ist, ist die Tatsache, dass Züge auf ihren Gleisen gebunden sind und somit ein Freiheitsgrad weniger zu berücksichtigen ist.

Ein seitlich am Fahrzeug montierter Wirbelstromsensor (siehe Abschnitt 3.2.3.2, Abbildung 5-2 Links) misst die Inhomogenitäten im metallischen Gleisumfeld zwischen der ersten und zweiten Spule bei Weichen oder Gleisverschraubungen [Engelberg 2001]. Der Wirbelstrom-

sensor ermöglicht mit seinem Messprinzip eine hochgenaue Geschwindigkeitsmessung, Positionsbestimmung und liefert eine exakte Aussage über die Position und Fahrtrichtung beim Überfahren einer Weiche [Böhringer 2008].



**Abbildung 5-2 Wirbelstromsensor (Links), Schaltschrank (Mitte) und GNSS-Antenne (Rechts) am Fahrzeug der Tatrabahn**

Eine digitale Streckenkarte liefert eine hohe Genauigkeit bezogen auf streckentypische Merkmale wie z.B. Weichen oder die Position virtueller Balisen [Schnieder et al. 2006].

Nach der Datenfusion aller Messwerte ist es möglich, eine exakte Position zu berechnen und diese in einem dem ETCS vergleichbaren Format auszugeben. Diese Daten besitzen, versehen mit einem qualifizierten Vertrauensbereich und einer Unsicherheit, eine hohe Zuverlässigkeit.

Zur Positionsbestimmung ist die Verwendung mehrerer Sensoren inkl. Sensordatenfusion genauer als bei Verwendung einzelner Sensoren. Das System wird durch die Verwendung von verschiedenen Sensoren robuster, womit eine kontinuierliche Positionsermittlung eines Zuges gewährleistet werden kann. Die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit für das ERTMS/ETCS System beträgt  $\pm 5\text{m} \pm 2\%$  der gefahrenen Distanz. Diese Anforderungen können durch das vorgestellte System erfüllt werden [SUBSET 2002; Poliak et al. 2006a].

Ein großes Anwendungspotential der fahrzeugautarken Ortung als Basis für sicherheitsrelevante Anwendungen wird im Bereich der Sicherungssysteme bei Eisenbahnnebenstrecken im Niedrigpreissegment gesehen, welche im vereinten Europa einen großen Anteil des Gesamtschienenetzes einnehmen. Ein derartiges System kann dazu beitragen, die Sicherheit auf diesen Strecken wesentlich zu erhöhen. Aktuell besitzen derartige Strecken nur eine geringe oder keine Ausrüstung mit einem Sicherungssystem, sowie eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit, was dementsprechend zu einem schlechten Kosten-/Nutzenverhältnis führt. Es ist Stand der Technik, dass diese Strecken größtenteils ohne jegliche technische Sicherungseinrichtungen betrieben werden [Beisel et al. 2007; UIC 2007].

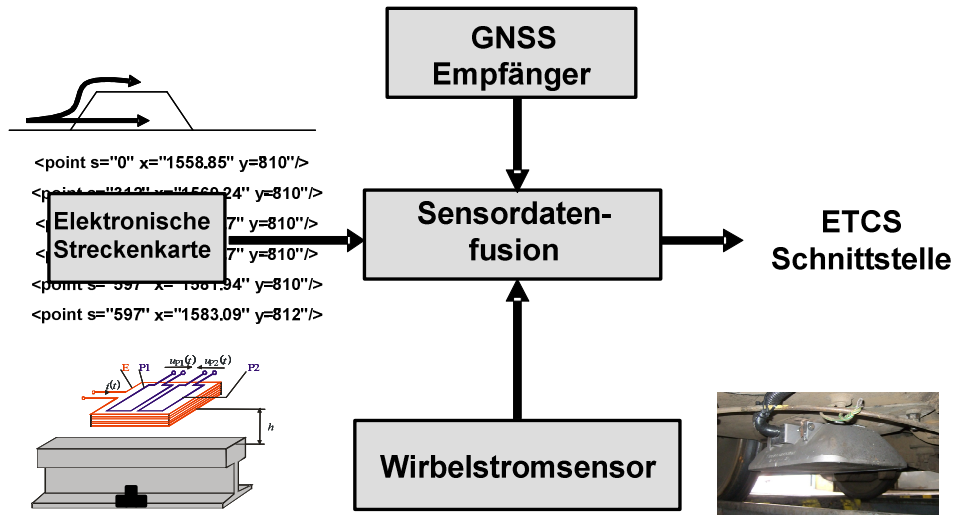


Abbildung 5-3 Multisensorsystem zur fahrzeugautarken Ortung [Schnieder et al. 2006]

## 5.3 Zusammenfassung

Das System DemoOrt könnte eine genaue Positionsinformation über jeden Zug auf der Strecke liefern und dem Zugleiter so eine exakte Aussage zur Zugposition liefern [Zahradnik, Rastocny 2006]. Somit kann das System als Grundlage für ein kostengünstiges Sicherungssystem verstanden werden [Schnieder et al. 2006; Beisel et al. 2007].

Ein weiterer Vorteil einer kontinuierlichen Übertragung der ermittelten Positionsdaten ist eine bessere Einschätzung der Streckenauslastung und detailliertere Information über die genaue Lage des Zuges im Augenblick des Fahrtablaufs. Dadurch können kritische Zugzustände schneller erfasst und behoben werden, was wiederum kostenreduzierend ist [Schnieder et al. 2006].

Das DemoOrt System wird als Applikationsbeispiel für das Validationsverfahren dienen, welches dann in der Kapitel 7 betrachtet wird.

# 6 Methodische Herleitung des Validierungskonzeptes

Auf Grundlage der in den vorgegangenen Kapiteln dargestellten Erkenntnisse über GNSS soll in den folgenden Abschnitten die Spezifikation eines methodischen Ansatzes zur Validierung und Qualifizierung der GNSS-Genauigkeit erläutert werden.

Das GNSS liefert die Position des Empfängers sowie die genaue Zeit. Daher ist wichtig, in welchem Zeit- und Koordinatenbezugssystem die Informationen ausgegeben werden, damit bekannt ist, in welchem System die errechnete Positions- und Zeitkorrektur vorliegt. Das Koordinatensystem muss bekannt sein, um die Positionsinformation interpretieren zu können.

Unter Genauigkeit versteht man die Übereinstimmung einer Einzelmessung mit einem Referenzwert [DIN ISO 5725-1 1997; DIN19259 1996; ISO GUM 1995]. Um die Validierung des GALILEO-Systems hinsichtlich seiner Genauigkeit durch führen zu können, wird also zunächst ein Referenzmesswert benötigt, der aus einem Referenzmesssystem hervor geht. Dieses besteht aus einer Kombination von Sensorik und Algorithmik [DIN70000 1994]. Die tatsächliche Empfängerposition kann z.B durch Interpolation zwischen vermessenen Referenzpunkten an der Messstrecke ermittelt werden.

In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, welche grundsätzlichen Anforderungen an das Referenzmesssystem gestellt werden müssen, um eine Validierung von GNSS basierten Anwendungen durchzuführen sowie die spezifischen Anforderungen zu erläutern, welche als Erweiterung für das Messmanagementsystem (siehe Abschnitt 9.2) dienen können [DIN ISO 5725-1 1997].

## 6.1 Aufgaben und Probleme der Validation

Das GNSS-System liefert Informationen über die Position des Empfängers in X-Y-Z-Richtung, die er zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  einnimmt. Gleichzeitig wird die Position des Empfängers auch vom Referenzmesssystem gemessen. Um die vom GNSS gelieferte Position zu bewerten, muss anhand der gemessenen Referenzposition eine Qualifizierung erstellt werden. Der Positionsfehler wird dann mittels verschiedener Verfahren berechnet (siehe Abbildung 6-1).

Sowohl das GNSS als auch das Referenzmesssystem bringen Fehler in die Berechnungen und damit Messunsicherheit ein. Um eine qualifizierte Aussage über die Positionsfehler zu machen, muss das System definierten Anforderungen (siehe Abschnitt 6.2) genügen - einige dieser Anforderungen werden in diesen Abschnitten erläutert.

---



Abbildung 6-1 Generische Darstellung des Validierungs- und Qualifizierungsprozesses

### 6.1.1 Korrespondenzfindung zwischen Koordinatensystemen

Die Messdaten der beiden Systeme werden in unterschiedlichen Koordinaten- und Bezugssystemen erfasst. Die Systeme müssen zueinander in Beziehung gesetzt werden, sodass die Messdaten von einem System in ein anderes transformiert oder in einem anderen System dargestellt werden können. Diese Transformation zwischen Koordinatensystemen ist teilweise eine mathematische sehr anspruchsvolle Aufgabe. Außerdem werden hierfür spezielle ortbezogene Transformationsparameter benötigt, die schwer zu beschaffen sind. Es folgt daher an dieser Stelle eine Betrachtung der wichtigsten Koordinaten- und Bezugssysteme und der Transformationen zwischen diesen Systemen.



Abbildung 6-2 Koordinatentransformation

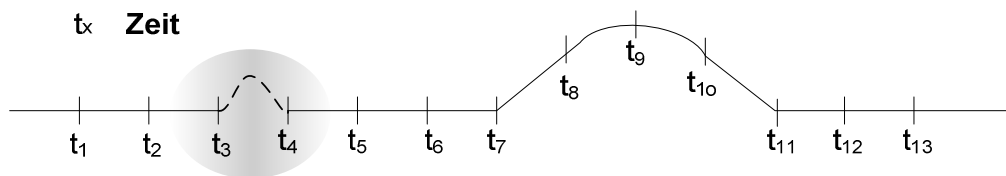
Eine Weiterverarbeitung von GNSS-Ergebnissen fordert mehrere Transformationen. Im GPS wird das WGS84-Bezugssystem verwendet [Schildt 2008]. Das GALILEO-System verwendet die GTRF (GALILEO Terrestrial Reference Frame), die sich bisher noch in der Entwicklungsphase befindet [Barbu 2008a].

### 6.1.2 Zeitsynchronisation und Abtastrate

Eine Zeitsynchronisation zwischen dem GNSS und dem Referenzmesssystem ist erforderlich, um überhaupt einen Positionsfehler oder eine Positionsabweichung berechnen zu können. Eine mangelhafte Zeitsynchronisation führt zu Schwankungen oder Versatz in der Positions-berechnung und dadurch zu einem Qualifikationsfehler [Seeber, Schmitz 2007].

Die Messungen müssen in hinreichend kleinen Abständen durchgeführt werden, da sonst möglicherweise Krümmungen (siehe Abbildung 8.4) nicht erfasst werden können. Diese

Abstände oder diese Abtastrate ist abhängig von der maximalen Bewegungsgeschwindigkeit, den Bewegungs- und Beschleunigungsgrade [Bazant et al. 2008] des GNSS basierten Systems und weiteren Eigenschaften, die sich in der Anforderungsspezifikation widerspiegeln [Seeber, Schmitz 2007; Dakoupki 2008].



**Abbildung 6-3 Einfluss der Abtastfrequenz auf die Positionierung**

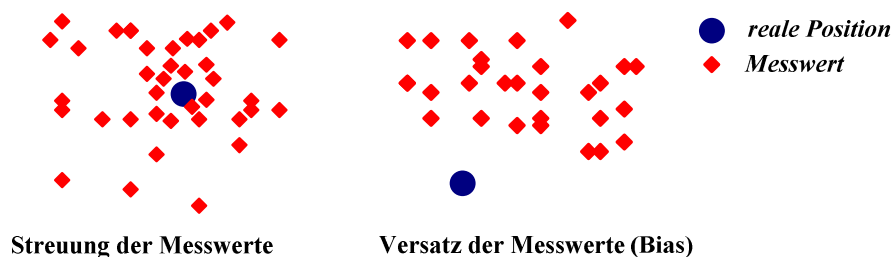
Allerdings ist im Fall von Realversuchen hierfür ein höherer technischer Aufwand vonnöten, da die Referenzposition synchron mit der Erfassung der Informationen des Empfängers zur Verfügung stehen muss. Wenn ein Empfänger beispielsweise eine Geschwindigkeit von 100 km/h (entsprechend 27,8 m/s) und eine Zeitdifferenz von 10 ms zum Referenzsystem, der Referenzortungsplattform, aufweist, resultiert eine theoretische Mindestunsicherheit von 0,278 m [Becker et al. 2008].

Die Krümmung einer Kurve ist unabhängig vom zugrunde liegenden Koordinatensystem. Sie ist definiert durch den Kontingenzwinkel zwischen den Tangenten an die Kurve durch zwei Punkte, welche voneinander entfernt sind. Weitere vertiefende Informationen über dieses Thema finden sich in der Arbeit von [Czommer 2000].

### 6.1.3 Auswertung der Messwerte in Bezug auf die Messunsicherheit

Der Schwerpunkt des Validierungs- und Qualifizierungsprozesses liegt auf der Betrachtung der sicherheitsrelevanten Anwendung von GNSS.

Die im Abschnitt 4.8.4 beschriebenen Fehler haben zur Folge, dass entweder eine Messunsicherheit der Position oder ein Versatz der Position (Bias) auftreten können (siehe Abbildung 6-4). Der Bias beschreibt die mittlere Abweichung der wahren Position zu der berechneten Position. Die Messunsicherheit der Position kann durch statistische Verfahren, wie zum Beispiel die Angabe des Mittelwerts aller berechneten Positionen, eliminiert werden. Der Bias dagegen ist schwer zu korrigieren und fordert eine gute Kenntnis des Systems bzw. des Phänomens das den Bias verursacht [Bohm, Zech 2006; Box et al. 2005].



**Abbildung 6-4 Streuung und Versatz der Messwerte bei GNSS**



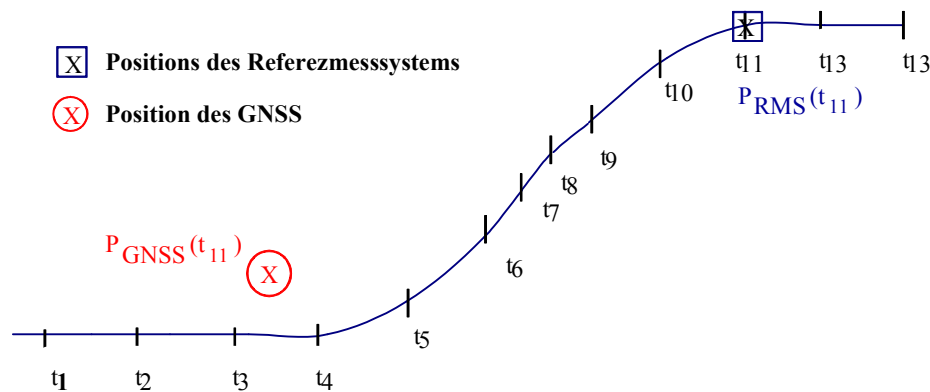
## 6.1.4 Schlussfolgerung

Um eine qualifizierte Aussage über die Positionsfehler der GNSS-Ortung machen zu können, müssen die oben genannten Anforderungen sehr genau betrachtet und berücksichtigt werden. Bei der Interpolation der Messstellen von GNSS und vom Referenzmesssystem auf die Messtrajektorie wird darauf geachtet, dass alle Faktoren, die eine Messunsicherheit (siehe Abbildung 8.5) im Validationsprozess bedeuten können, sowohl vom GNSS-System als auch vom Referenzmesssystem berücksichtigt werden, z.B.

- Koordinatentransformation,
- Zeitsynchronisation,
- Geschwindigkeitseinfluss,
- Beschleunigungseinfluss,
- Krümmungen der Messtrajektorie
- usw.

Die aufgelisteten Ursachen von Messfehlern haben zur Folge, dass die mit GNSS berechnete Position und die mit dem Referenzmesssystem gemessene Position nicht übereinstimmen muss, wie es in Abbildung 6-5 zu sehen ist.

Der vom GNSS gelieferte Messwert hat einen Versatz gegenüber dem gemessenen Messwert des Referenzmesssystems, obwohl die beiden Systeme ihre Messwerte zur selben Zeit ermittelt haben.



**Abbildung 6-5 Korrespondenzfindung zwischen Referenz- und GNSS-Positionierungen**

Die Differenz  $\Delta X$  und  $\Delta Y$  (Koordinatenebene) nach den Gleichungen (6-1) kann als Maß für die Genauigkeit der GNSS-Ortung gelten und beruht auf dem Interpolationsverfahren (siehe Abbildung 6-6) [Dakoupki 2008].

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_{GNSS} - X_{RMS} \\ \Delta Y &= Y_{GNSS} - Y_{RMS}\end{aligned}\tag{6-1}$$

In vielen Anwendungen ist die Betrachtung von Messwerten im Raum erforderlich. Solche Fälle wurden hier nicht dargestellt. Grundsätzlich kann man jedoch sagen, dass die hier vorgestellten Validationsverfahren auch für solche Fälle einsetzbar sind.

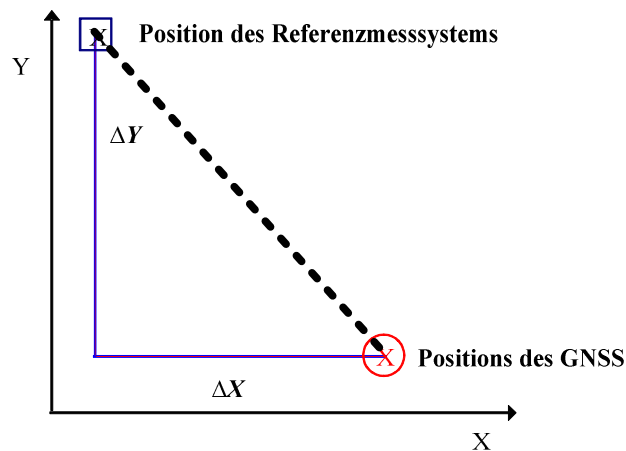


Abbildung 6-6 Darstellung der Differenz als Maß für die Genauigkeit des GNSS in einer Ebene

### 6.1.5 Generische Empfehlung für ein Validierungswerkzeug

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, dass die bisher existierenden Werkzeuge (siehe Abschnitte 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3, 1.4.4, 1.4.5 und 1.4.6) nur bedingt für eine umfassende Validierung satellitenbasierter Ortung für Bahnanwendungen geeignet sind, stellt Abbildung 6-7 ein Gesamtkonzept vor, dass die allgemein dargestellten Anforderungen aufgreift.

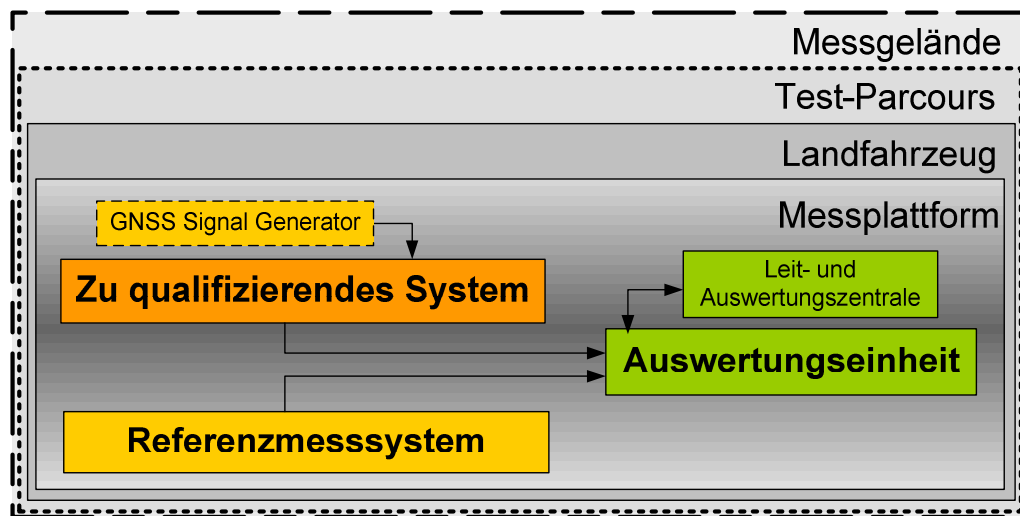


Abbildung 6-7 Grundsätzlicher Aufbau eines Referenzmesssystems [Hänsel et al. 2007]

Das gesamte Konzept sieht sowohl reale als auch simulative Untersuchungen vor, um die jeweiligen Nachteile zu kompensieren. Hier wird eine Referenzmessplattform (siehe Kapitel 7) benötigt, um als Quelle der Referenzposition bei den Realversuchen zu dienen.

Für die Simulation der passenden GNSS Umgebung z.B. direkter Empfang von einem oder mehreren Satelliten, Abschattungen, Signalfehler, TTFF-Merkmale usw. kann ein GNSS Signalgenerator eingesetzt werden.

Zur Durchführung der Messungen soll ein Test-Parcours definiert werden, auf dem die charakteristischen Einsatzfälle und Störungseinflüsse reproduzierbar nachempfunden werden können. Hier können die Testfahrten durchgeführt werden (siehe Abschnitte 7.5.1, 7.5.2 und 7.5.3). Als Versuchsträger dient zur Durchführung von Testfahrten auf dem Parcours ein Schienenfahrzeug, das mit den entsprechenden Einrichtungen versehen wird.

Um die Ergebnisse der Versuche vergleichbar zu gestalten, ist eine Gewährleistung von bestimmten Umgebungsbedingungen notwendig. Hierzu bietet es sich an, die Umgebung während der Versuche direkt zu beobachten und diese Beobachtungen aufzuzeichnen (siehe Abschnitt 1.4.7) [Poliak et al. 2008b].

## **6.2 Methodischer Ansatz zur Anforderungs- und Lösungsanalyse für ein Validierungswerkzeug**

Jede Disziplin und jede Branche haben ihre eigenen Methoden und Vorgehensweisen. Diese Abgrenzungen wurden historisch entwickelt und funktionieren auch gut, solange man in einem Projekt, System, Subsystem oder nur einer Aufgabe innerhalb einer Branche bleibt. Bei disziplinübergreifenden Projekten wird es dann deutlich schwieriger. Zwischen den Methoden und Vorgehensweisen einzelner Disziplinen müssen Schnittstellen beschrieben und geschaffen werden. Das Produktmanagement, Sicherheitsspezialisten, Marketing und viele Andere müssen ihre Anforderungen in den Entwicklungsprozess einbringen. Das Projektmanagement muss die Spezifika aller Disziplinen berücksichtigen [Pacovsky 2006; Weilkiens 2006].

Die Ergebnisse von vielen interdisziplinären Projekten machen deutlich, dass Missverständnisse und Konflikte vorprogrammiert sind. Die Systeme sind und werden komplexer und komplizierter [Weilkiens 2006].

*Die **Komplexität** bezieht sich auf die Anzahl und Art der Beziehungen zwischen den Elementen eines Systems [Weilkiens 2006].*

*Die **Kompliziertheit** bezieht sich auf die Anzahl der unterschiedlichen Elemente [Weilkiens 2006].*

In solchen Fällen greift man immer häufiger auf sogenannte Anforderungsanalysewerkzeuge (Requirements analyse tools) zurück. Hier sind z.B. DOORS und MKS Studio [Telelogic 2001a; Artisan 2007] zu erwähnen.

ID	Kundenanforderungen für die Kapitel 1-3	Anforderung	Kommentar	Begründung	Verantwort	Anforderungsgeber	Priorität	Ph
3	<b>1 Projektübersicht</b>				ELR		missig	
4	<b>1.1 Einleitung</b>				ELR		missig	
15	Beschreibung des Systems (Wissensbasis der DemoOrt-Plattform)	False			ELR		missig	
7	<b>1.2 Allgemeines zum vorliegenden Dokument</b>	False			ELR		missig	
8	<b>1.2.1 Definition und Bemerkung zum Dokument</b>	False			ELR		missig	
9	<b>1.2.2 Ziel des Dokumentes</b>	False			ELR		missig	
10	<b>1.2.3 Handhabung und Lebenszyklus des Dokumentes</b>	False			ELR		missig	
11	<b>1.2.4 Einbindung in die Projektdokumentation</b>	False			ELR		missig	
4	<b>2 Funktionale Anforderungen</b>	False			ELR		missig	
16	<b>2.1 Ortungsgüter/Ortungsqualität</b>	False			ELR		missig	
17	<b>2.1.1 Längsgenauigkeit</b>	True		Längsgenauigkeit entsprechend der gegebenen Genauigkeit. Mindestgenauigkeit vgl. ETCS SRS: +/- 5 m.	ELR	Übergeordnetes System, z.B. zukünftiges Sicherungssystem.	missig	T
28	<b>2.1.1.1 Vertrauensintervall Längsrichtung</b>	True		Die Genauigkeit in Längsrichtung wird durch ein Vertrauensintervall erweitert, das in Abhängigkeit zur letzten Absolutpositionsermittlung anwachsen darf (+/- 2% der Strecke).	ELR		missig	
18	<b>2.1.2 Quergenauigkeit</b>	True		Quergenauigkeit entsprechend der gegebenen Genauigkeit, mindestens gleiches Interv. +/- 2,5 m.	ELR	Übergeordnetes System, z.B. zukünftiges Sicherungssystem.	missig	T
21	<b>2.1.3 Fahrtrichtungserkennung</b>	True		Erkennung der Fahrtrichtung (vorwärts / rückwärts)	ELR		missig	
22	<b>2.1.4 Beschleunigungserkennung</b>	True		Erkennung der jeweils aktuellen Beschleunigungsumstände des Fahrzeuges (positive /	ELR		missig	

Abbildung 6-8 Anforderungsanalyse mit der Software DOORS (Screenshot aus dem Projekt DemoOrt)

## 6.2.1 Grundsätzliche Systemspezifikation

Die Anforderungsspezifikation des Validierungsprozesses erfolgte in einer streng strukturierten Gliederung. Es wird eine Kette von vier Spezifikationsdokumentenlevels verwendet. Die Spezifikationen weisen einen steigenden Detaillierungsgrad auf, beginnend mit der URS (User Requirements Specification) und endend mit der FFFIS (Form Fit Functional Interface Specification).



Abbildung 6-9 Ablauf der Systemspezifikation

Die einzelnen Anforderungen bilden eine Basis für die Anforderungsliste (siehe Abschnitt 6.3).

## 6.2.2 Ansatz für methodische Spezifikationserstellung – Requirements Engineering

Die einzelnen Anforderungen sollten miteinander verlinkt sein und bilden einen Anforderungsbaum (Anforderungsmodell). Mit dieser Vorgehensweise sind Inkonsistenzen sowie Widersprüche leichter zu entdecken.

Die Erstellung der Spezifikationsdokumente (Z.B. Anforderungsliste, siehe Abschnitt 6.3) erforderte ein stringentes und koordiniertes Vorgehen. Daher kam hierfür ein spezielles Softwaretool für das Requirements Engineering, das Programm „DOORS“ des Softwarehauses „Telelogic AB“, zum Einsatz [Telelogic 2001a, Telelogic 2001b].

DOORS ermöglicht es, in einem verteilten und interdisziplinären Projektteam gemeinsam an der Anforderungsspezifikation zu arbeiten. Die Projektmitarbeiter greifen auf eine gemeinsame Datenbasis zu. Ein zeitaufwändiger und fehleranfälliger Austausch der Daten konnte so vermieden werden [Telelogic 2001a].

Neben der Erstellung der Anforderungen ist auch das Review der Dokumente nach mehreren Kriterien wichtig.

Die Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten in der angesprochenen Domäne zeigen, dass es sinnvoll ist für diesen Fall die technischen Anforderungen mittels eines Anforderungsmanagementprogramms („DOORS“) zu erstellen. Anforderungsliste

Um Ziele und Bedingungen einer bestimmten Aufgabe wie der Entwicklung eines Produktes, herausarbeiten zu können, ist es vorteilhaft, eine Anforderungsliste zu erstellen. Für die Erstellung der Anforderungsliste werden die Zielsetzungen für die Entwicklung des Produktes, die so genannten Anforderungen, festgehalten. Neben den qualitativen und quantitativen Anforderungen gehören außerdem Aussagen über Verantwortlichkeit, Gültigkeitsstatus sowie organisatorische Informationen dazu [Franke 2002]. Es gibt drei Anforderungsarten, die in einer Anforderungsliste festgehalten werden:

- Festanforderung: Ohne das Erfüllen dieser Forderung ist die Lösung der Aufgabe nicht akzeptabel.
- Mindestanforderung: Diese Anforderungen müssen mindestens einen bestimmten Grenzwert erreichen oder einhalten.
- Wunschanforderung: Hierbei ist es vorteilhaft, wenn diese Anforderungen erfüllt werden können. Sie treten aber in Konkurrenz zu ersteren Forderungen zurück.

Beim Erstellen einer Anforderungsliste ist darauf zu achten, dass die Informationen so verständlich wie möglich aufgeschrieben werden. Außerdem müssen sie eindeutig, widerspruchsfrei und prüfbar sein. Dabei ist es notwendig, sich mit allen möglichen Einflüssen auf das System wie auch den Wünschen des Auftraggebers auseinanderzusetzen. Die gesetzlichen Bestimmungen dürfen ebenfalls nicht vernachlässigt werden.

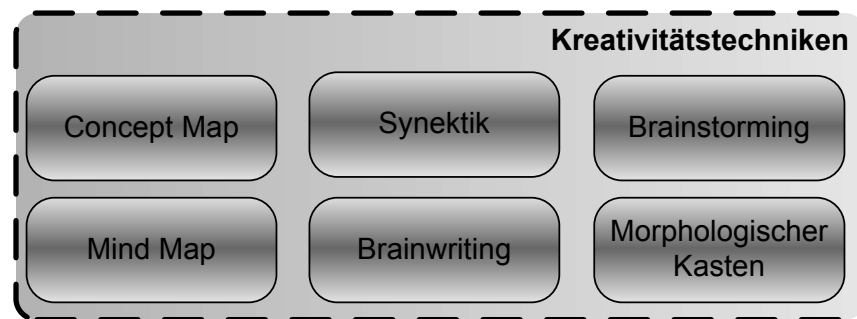
Eine solche Anforderungsliste wurde mit Hilfe der Software DOORS erstellt und reviewt. Ein beispielhafter Auszug daraus ist in der Tabelle 6-2 zu finden.

## 6.2.3 Morphologischer Kasten

Der morphologische Kasten ist eine morphologisch-analytische Kreativitätstechnik, bei der systematisch an eine Ideenführung herangegangen und diese mit Hilfe einer Matrix bearbeitet wird [Franke 2002]<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Das Wort „Morphologie“ stammt aus dem Griechischen und bedeutet „Lehre der Gestaltung, Strukturierung und Formung“ Franke 2002.



**Abbildung 6-10 Kreativitätstechniken**

Der morphologische Kasten ist neben *Concept Map*, *Synektik*, *Brainstorming*, *Mind Map*, und *Brainwriting* eine der bekanntesten Kreativitätstechniken (Abbildung 6-10) und wurde von dem Schweizer Astrophysiker Fritz Zwicky (1898-1974) entwickelt. Ziel dieser Methode ist es, durch Zerlegung des Problems in Teillösungen, Variation dieser Lösungsaspekte und anschließender Verknüpfung möglichst nahe an das denkbare Lösungsoptimum heranzukommen. Es werden auch die Schwachstellen der Lösung erkannt und durch die vorhandenen Teillösungen rasch beseitigt [Franke 2002].

Die Aufgabe wird definiert, analysiert und in die wesentlichen Eigenschaften zerlegt. Diese müssen variiert werden, können und sollten das gesamte Spektrum der Möglichkeiten die in der Aufgabe stecken abdecken.

Den Eigenschaften werden Merkmale zugeordnet (siehe Abschnitt 2.1). Die ausgewählten Merkmale sollen möglichst unabhängig voneinander sein, auf sämtliche Lösungsvarianten zutreffen und für das Gesamtproblem relevant sein. Dieser Schritt kann durch den Einsatz weiterer Kreativitätstechniken wie *Mind Mapping* unterstützt werden.

Die Ergebnisse aus dem morphologischen Kasten wurden in Rahmen dieser Arbeit nicht dargestellt, weil eine Darstellung dieser vielfältigen Analyse den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

### **6.3 Lösungsansätze und Auswahl der Sensoren für das Referenzmesssystem**

Die Ergebnisse aus dem morphologischen Kasten wurden berücksichtigt und die einzelnen Eigenschaften auf ihre tatsächliche Verwertbarkeit hin überprüft. Außerdem wurde eine Vorentscheidung bezüglich der Sensoren für das spätere Referenzmesssystem getroffen (siehe Tabelle 6-1).

Aus der Vielzahl der in dem morphologischen Kasten identifizierten Lösungen für Sensoren und Messverfahren sind nur wenige dafür geeignet, unter den realen Randbedingungen angewendet zu werden. So ist es sinnvoll, ein oder mehrere Sensoren zum Erfassen der gefahrenen Strecke anzubringen. Dazu eignen sich zum Beispiel Radimpulsgeber (siehe Abschnitt 3.2.3.1), Dopplerradar (siehe Abschnitt 3.1.2) oder eine ähnliche Technologie, die mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung, die von einer festen Station oder auch von der Messplattform selber gesendet wird. Diese messen die Geschwindigkeit wie auch den Abstand, die Richtung und die gefahrene Strecke der Messplattform (siehe Tabelle 6-1).

Es ist auch nötig, die Fahrtrichtung zu erkennen. Dafür gibt es unterschiedliche Lösungsansätze. Sowohl eine Radaranlage als auch die Laserentfernungsmessung eignen sich hierzu, wobei bei allen optischen Messverfahren immer die Verschmutzung der Sensoren zu berücksichtigen ist.

Es ist sehr anspruchsvoll, einen einzigen Sensor für alle Aufgaben zu wählen. Aus Komplexität, Wirtschaftlichkeits- und Realisierbarkeitsgründen wurde für die Bestimmung von Geschwindigkeits-, Wegmessungs- und Fahrtrichtungsmerkmalen das Dopplerradar ausgewählt (siehe Abschnitt 7.1).

Ein weiterer wichtiger Bewertungspunkt ist, dass eine ereignisorientierte Ortung stattfinden soll. Bei einer ereignisorientierten Ortung wird ein auf der Messstrecke eindeutig definierter geographischer Punkt detektiert. Damit wird eine genaue Positionsbestimmung der Messplattform in diesem Moment gewährleistet. Dieses Verfahren ist notwendig, um die Kalibrierung der anderen Sensoren zu gewährleisten. Dabei sind besonders Radimpulsgeber und Dopplerradare anfällig, da sie die gefahrene Strecke durch Integration der Geschwindigkeit erhalten und damit auch Messunsicherheit aufsummiert wird [Maljuk 2006].

Es ist sinnvoll ein Verfahren zu wählen, das einerseits sehr robust ist, andererseits auch einen sehr genauen Standort der Messplattform detektieren und übermitteln kann. Der Einsatz von Laser, Lichtschranke, Balise oder RFID-Datenträger erscheint in diesem Fall sehr sinnvoll. Im Falle der Nutzung von Balise und RFID-Datenträgern ist es sogar möglich, außer einer genauen Positionsinformation auch andere, zusätzliche Daten zu übermitteln, welche nicht nur die reinen Ortungsinformationen sondern auch zulässige Geschwindigkeiten oder Streckenprofile beinhalten können [Baumer Ident 2003].

Für die ereignisorientierte Ortung und Kalibrierung eignet sich unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeits- und Realisierungsmerkmalen ein modifiziertes RFID-System.

**Tabelle 6-1 Beispiel für Auswahl den Sensoren für das Validationswerkzeug**

Merkmal, Größe	Wertebereich	Sensoren	Empfehlung
<b>Geschwindigkeit</b>	0,01-120,00 km/h	Wegimpulsgeber, Dopplerradar, Lidar	Dopplerradar
<b>Wegmessung</b>	0,01 – 30000,00 m	Wegimpulsgeber, Dopplerradar, Lidar	Dopplerradar
<b>Fahrtrichtung</b>	vorwärts / rückwärts	Wegimpulsgeber, Dopplerradar, Lidar	Wegimpulsgeber
<b>Ereignisorientierte Ortung</b>	Ja / Nein	Laser, Lichtschranke, RFID System, Balise	RFID System
<b>Kalibrierungspunkte</b>	alle 200 m	Lichtschranke, RFID System, Balise	RFID System
<b>Kalibrierungsungenauigkeit</b>	±0,5 m	Lichtschranke, RFID System, Balise	RFID System

Für das Referenzmesssystem muss eine elektronische Karte spezifiziert und erstellt werden. Dabei sollen bestimmte Punkte oder Streckenmerkmale auf der Strecke genau beschrieben werden und vor allem muss die Entfernung zu den nächsten Referenzpunkten genau bekannt sein. Diese Problematik wird in Abschnitt 7.2 genauer betrachtet.

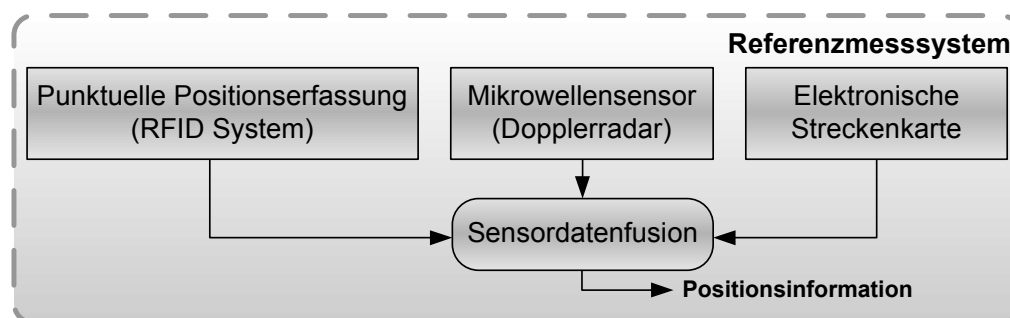
Die möglichen Lösungsansätze für das Referenzmesssystem wurden anhand der Anforderungen an Messverfahren, Validations- und Qualifikationseigenschaften analysiert und ausgewertet. In diesem Prozess muss man alle möglichen Betriebszustände, Messzustände, Umge-

bungsbedingungen, Wartungsmöglichkeiten und Robustheit gegen äußere Einflüsse sowie die Messunsicherheit betrachten [DIN ISO 5725-2 2002; DIN ISO 5725-3 2003; DIN ISO 5725-4 2003; DIN ISO 5725-5 2002; DIN ISO 5725-6 2002; DIN ISO 5725-1 1997]. Eine beispielhafte Darstellung von Ergebnissen dieser Analyse ist in Tabelle 6-1. Ein Auszug von der Anforderungsliste an das Referenzmesssystem ist in Tabelle 6-2 dargestellt.

**Tabelle 6-2 Ausschnitt der Anforderungsliste an das Referenzmesssystem für die GNSS basierte Anwendungen**

Gliederung	Bezeichnung	Werte, Daten	Anf. Art	Quelle, Bemerkungen
<b>1. Geometrie</b>	<i>Einbauraum</i>	Es ist darauf zu achten, dass der Einbauraum so klein wie möglich gehalten wird. 19" Schrank muss eingehalten werden.	F	System
	<i>Einbaumöglichkeit</i>	Um das System einbauen zu können, muss die Lage der Daten- und Stromkabel wie auch die Karosseriestruktur genau bekannt sein.	F	System
<b>2. RAMS</b>	<i>Reliability (Zuverlässigkeit)</i>	MTTF nach CENELEC	F	EN 50126
	<i>Availability (Verfügbarkeit)</i>	MTBF nach CENELEC	F	EN 50126
	<i>Maintenance (Instandhaltbarkeit)</i>	möglichst geringe Anzahl der Wartungstage	F	
	<i>Safety (Sicherheit)</i>	Es muss sichergestellt werden, dass keine Personen oder Güter gefährdet werden	F	EN 50126
<b>3. Ortungs- vorgaben</b>	<i>Quergenauigkeit</i>	Gleisgenaue Ortung 0,5 m Abweichung erlaubt. Gleisselektivität muss sichergestellt werden.	F	System
	<i>Fahrtrichtungserkennung</i>	Erkennung der Fahrtrichtung	F	System ISO 5725-1
	<i>Längsgenauigkeit</i>	Längsgenauigkeit max. 0,5 m	F	System
	<i>Beschleunigungs- Erkennung</i>	Erkennung der jeweils aktuellen Beschleunigungszustände des Fahrzeuges	W	System
	<i>Stillstands-Erkennung</i>	Erkennung des Stillstandes des Fahrzeuges	W	System
	<i>Zeitstempel</i>	Mit max. Abweichung von 0.01 s	F	System
	<i>Digitale Streckenkarte</i>	Digitalisierte Streckenpunkte im Weichenbereich.	F	System
	<i>Aktualisierung der Digitalen Karte</i>	Es muss dabei die Möglichkeit gegeben werden, eine neue Version der digitalen Streckenkarte benutzen zu können, um die Veränderungen an der Strecke zu berücksichtigen	F	System
	<i>Kontinuierliche Verfolgung</i>	Nur in bestimmten Messbereichen	F	System

Die Abbildung 6-11 stellt das Konzept für das Validierungswerkzeug (Referenzmesssystem) dar. Die Daten werden mit Hilfe des Mikrowellensensors und der RFID-Transpondersysteme gesammelt und mit den Daten der Streckenkarte ausgewertet [Poliak et al. 2006b].



**Abbildung 6-11 Konzept des Referenzmesssystems zu Positionsbestimmung mittels Transponder, Mikrowellensensor und Streckenkarte**

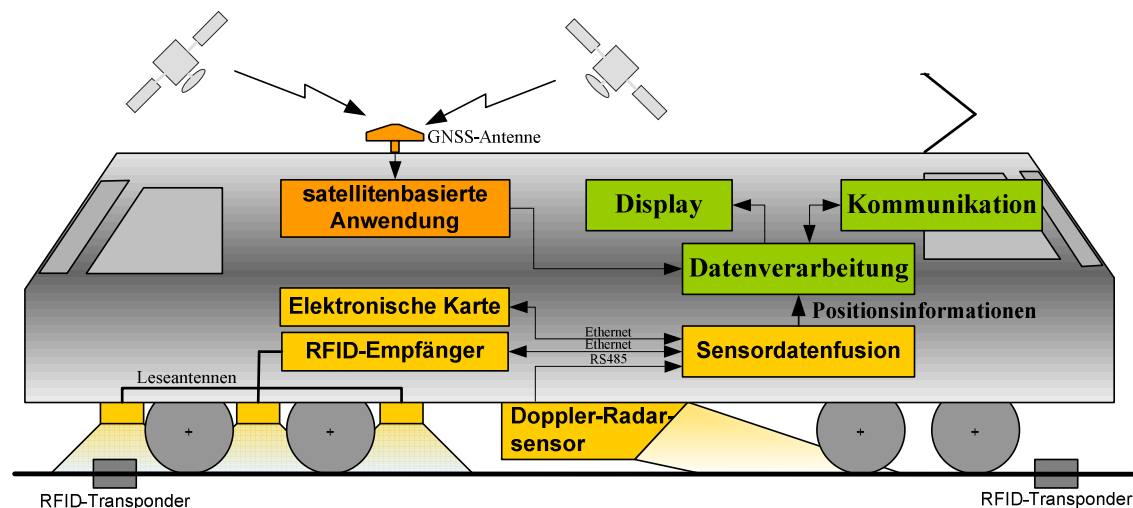


Das Referenzmesssystem ist Bestandteil des Validationskonzeptes (siehe Abbildung 6-1 und Abbildung 6-7).

## 6.4 Referenzmesssystem

Eine Referenzmessplattform für die Bewertung satellitenbasierter Anwendungen im Eisenbahnbereich wurde errichtet und ihre Validation wird zurzeit durchgeführt (Abbildung 6-12). Diese Plattform verwendet zwei unterschiedliche Sensorsysteme und eine genaue Streckenkarte [Svítek 2006].

Der erste Sensor ist ein Dopplerradar für eine kontinuierliche Messung der relativen Position entlang der Strecke. Dieser Sensor hat den Nachteil einer relativen großen Drift (0,2%), die stabilisiert werden muss [Poliak et al. 2007a].



**Abbildung 6-12 Systemstruktur der Referenzplattform für den Schienenverkehrsbe- reich [Poliak et al. 2006c]**

Die RFID-basierte Absolutortung wird als zweiter Sensor verwendet, um die Drift des Radarsensors zu stabilisieren. Für das RFID-System sind Transponder entlang der Strecke angebracht, die absolute Markierungen darstellen. Die Positionen der eindeutig identifizierten Transponder sind mit hoher Genauigkeit (ca. 0,5 cm) bekannt. Laut den Spezifikationen [DIN13005 1999] muss das Referenzmesssystem mindestens 10-mal genauer sein als das zu testende System. Dies bedeutet, dass die Genauigkeit entlang der Strecke ca. 50 cm betragen muss. Vom Standpunkt der Kosten und der Genauigkeit aus ist es notwendig, die RFID-Transponder auf der Strecke zu verteilen. Auf den geraden Streckenteilen beträgt die maximale Distanz 250 Meter, in den Kurven muss diese Distanz genau berechnet werden, um die Ungenauigkeit durch die Unterschiede zwischen Sekanten- und Bogenlänge zu minimieren [Poliak et al. 2008a].

Deren Position ist in einer XML-basierten, elektronischen Streckenkarte gespeichert, um Informationen über die Übereinstimmung zwischen der Topologie der Strecke und der (geographischen) Position der Transponder zu erhalten. Die wichtigsten Informationen werden in der elektronischen Streckenkarte gespeichert.

## **6.5 Anwendungsbereiche**

Um selbst widersprüchliche Anforderungen für jede Anwendung zu erfüllen, wurde ein generisches Konzept entwickelt. Im Folgenden werden beispielhaft zwei generische Anwendungen im Detail diskutiert.

### **6.5.1 Zusätzliches Überwachungssystem für den Zugleitbetrieb**

Die erste Anwendungsmöglichkeit konzentriert sich auf ein spezifisches Feld der Zugleitsysteme, nämlich der Ortungssysteme für ERTMS/ETCS. Die Positionsgenauigkeitsanforderung für die ERTMS/ETCS Spezifikationen beträgt  $\pm 5\text{m} \pm 2\%$  der zurückgelegten Distanz [SUBSET 2002]. Das Projekt DemoOrt (siehe Abschnitt 5.2) zeigt die prinzipielle Funktion der Ortung [Poliak et al. 2006g].

### **6.5.2 Untersuchung des GNSS-Empfängers**

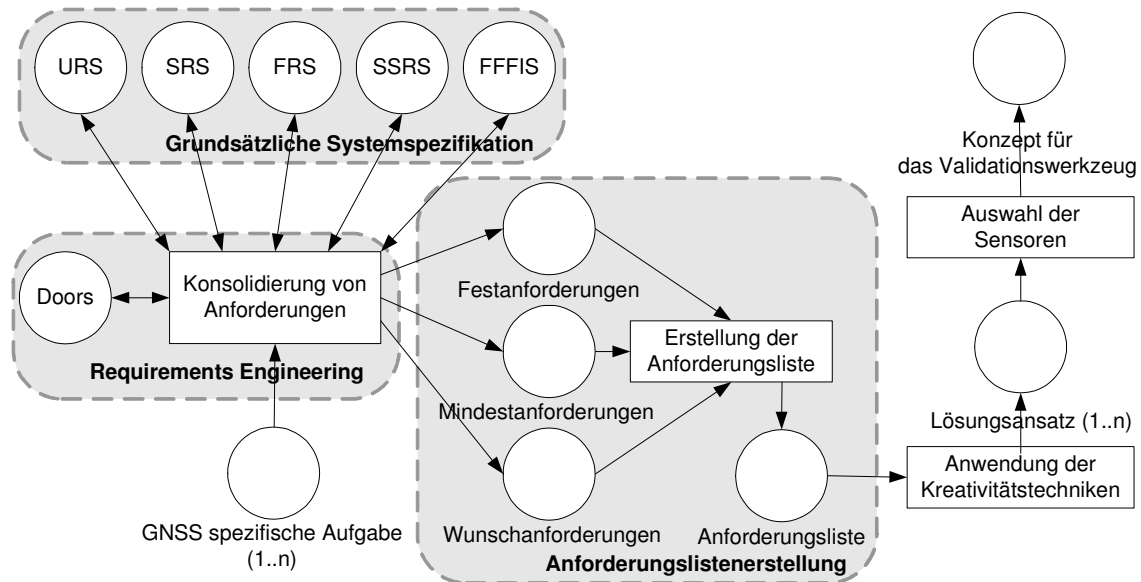
Die zweite Anwendung konzentriert sich auf ein spezifisches Feld eines GNSS-Ortungssystems. Für diesen Zweck ist nicht nur die Genauigkeit (siehe Abschnitt 4.9.1) entlang der Strecke wichtig, sondern auch die absolute Position des Fahrzeugs. Kritisch für diesen Anwendungsbereich ist die Untersuchung des GNSS-Empfängers. Es soll später ein Rahmenwerk für eine Überprüfung zukünftiger GNSS-Empfänger für sicherheitsrelevante Anwendungen entwickelt werden. Für diesen Zweck ist die Ortungsgenauigkeit auf 5 Meter definiert (die Anforderung für SoL Service für horizontale Genauigkeit beträgt 4 Meter) [ESA 2002b]. Hier sind die Anforderungen mit denen für das oben genannte Ortungssystem identisch.

## **6.6 Zusammenfassung**

In den vorherigen Abschnitten wurde beschrieben, welche grundsätzlichen Anforderungen an das Referenzmesssystem (siehe Kapitel 7) gestellt werden müssen, um eine Validierung von GNSS durchführen zu können sowie die spezifischen Anforderungen erläutert, welche als Erweiterung für das Messmanagementsystem (siehe Abschnitt 9.2) dienen können [DIN ISO 5725-1 1997].

Standards und die Analyse von Anforderungen an das Validationssystem wurden kurz aufgelistet. Die Problemstellung bei der Validierung von GNSS basierten Anwendungen im Eisenbahnbereich wurde kurz erläutert und die Korrespondenzfindung zwischen Koordinatensystemen, welche bei diesem Prozess zum Einsatz kommen, beschrieben. In dieser Arbeit wurden nur einige GNSS spezifische Gründe für Messfehler betrachtet. Die allgemeinen Anforderungen wurden nicht aufgelistet, obwohl sie die überwiegende Mehrheit bilden.

Die methodische Herleitung des Validierungskonzeptes wurde kurz erläutert (siehe Abbildung 6-13) und die Vorgehensweise für die Auswahl des Sensor- und Validationskonzeptes grob dargestellt.



**Abbildung 6-13 Methodische Herleitung des Validierungskonzeptes**

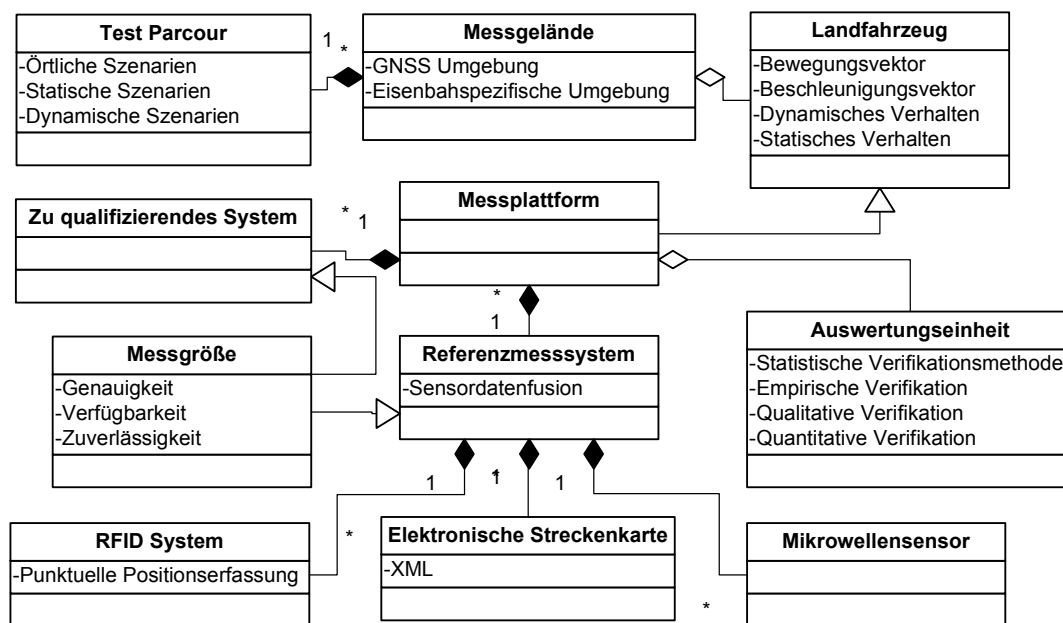
Die vordefinierten Anforderungen wurden dann mittels Kreativitätstechniken analysiert. Alle Schritte wurden nicht detailliert und vollständig erläutert, weil es die Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Das Ergebnis dieses aufwendigen Verfahrens ist in Kapitel 7 zu finden.

# 7 Realisierung des Validierungskonzeptes: GaTRail

Für die zukünftige Entwicklung von Verkehrssystemen wird die satellitenbasierte Ortung einen zunehmenden Stellenwert einnehmen [Gu 2005; UIC 2005b, UIC 2005a, UIC 2006]. Hierzu zählt auch, dass diese Ortung neben den bereits heute vorhandenen Informationssystemen auch für sicherheitsrelevante Anwendungen eingesetzt werden wird. Für die Nutzung solcher Systeme müssen entsprechende Zertifizierungen mit Sicherheitsnachweisen erstellt werden.

Um solche Zertifizierungen durchführen zu können, sind entsprechende Prozeduren aber auch Referenzmesssysteme für durchzuführende Messungen notwendig, welche über eigene, satellitenunabhängige Ortungseinrichtungen verfügen, die als messtechnische Referenz zur Bewertung der satellitenbasierten Ortungssysteme oder Anwendungen verwendet werden. Die konzeptuelle Beschreibung ist der Abbildung 7-1 zu entnehmen.



**Abbildung 7-1 Formale Darstellung des grundsätzlichen Aufbaus eines Referenzmesssystems auf einem Messgelände**

Die Referenzmessplattform, in unserem Fall GaTRail (GALILEO Test bed for Rail) genannt, ist für die Untersuchung eisenbahnspezifischer satellitenbasierter Ortungssysteme entwickelt worden, die den neuesten Standards und Vorschriften (wie. z.B. ERTMS/ETCS) entsprechen. Das Referenzortungssystem basiert auf einem RFID-System zusammen mit einem Dopplerradar sowie einer hochpräzisen, XML-basierten elektronischen Streckenkarte. Zur Stabilisierung der Drift des Dopplerradars wird das RFID-System zur Unterstützung eingesetzt. Auf diese Weise kann die Referenzposition mit einer Messunsicherheit von etwa  $\pm 25$  cm entlang der Strecke gewährleistet werden.

## 7.1 Mikrowellensensor (Dopplerradar)

Der Mikrowellensensor wird für die berührungslose Messung des Weges und der Geschwindigkeit über Grund eingesetzt. Das messtechnische Prinzip ist in Abschnitt 3.1.2. ausführlich erläutert. Für die Referenzmessplattform wurde der Sensor der Firma DEUTA eingesetzt.

Dieser Sensor ist insbesondere für die Anwendung bei Schienenfahrzeugen entwickelt worden und kann damit in einer Umgebung arbeiten, in der Temperaturen zwischen  $-40^{\circ}\text{C}$  und  $+70^{\circ}\text{C}$  herrschen. Der Sensor ist in einem stabilen Aluminiumgussgehäuse untergebracht und ist abgestimmt für die Montage außen am Fahrzeug [Deuta 2005].

Der DRS05 besitzt zwei Antennen, die kontinuierlich ein elektromagnetisches Feld senden und gleichzeitig einen Teil der vom Untergrund reflektierenden Wellen empfangen. Der Doppler-Effekt besagt, dass eine Frequenzverschiebung zwischen der gesendeten und der empfangenen Welle besteht. Diese Verschiebung hängt ab von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges und dem Winkel, mit dem das elektromagnetische Feld relativ zum Boden gesendet wird [Deuta 2005].



**Abbildung 7-2 Dopplerradar DRS05 [Deuta 2005]**

Die beiden Antennen des DRS05 senden mit unterschiedlichem Winkel auf den Untergrund und so entstehen zwei unterschiedliche Spektren, welche anschließend ausgewertet werden. Beim Einbau des Sensors ist darauf zu achten, dass die Eisenbahnschiene im Abstrahlwinkel beider Antennen liegt und sich keine beweglichen, rotierenden oder vibrierenden Teile im Strahlungsbereich der Antennen befinden. Sowohl der Einbauort und die Einbaumaße des Sensors als auch die beiden abgestrahlten elektromagnetischen Felder sind in der Abbildung 7-3 zu sehen.

Das verwendete Auswerteverfahren bestimmt die Frequenz im Schnittpunkt der beiden Dopplerspektren. Neben der Bestimmung der Dopplerfrequenz wird außerdem die Dopplerphase mit einer Antenne gemessen. Aus diesen Messwerten werden die Sensorgeschwindigkeit, der zurückgelegte Weg und die Sensorbewegungsrichtung berechnet [Deuta 2005].

Dadurch, dass der RDS05 zwei Antennen besitzt, wird auch bei Ausfall einer der beiden Antennen die Geschwindigkeits- und Wegmessung ermöglicht, wenn auch dabei die Messgenauigkeit größer wird [Deuta 2005].

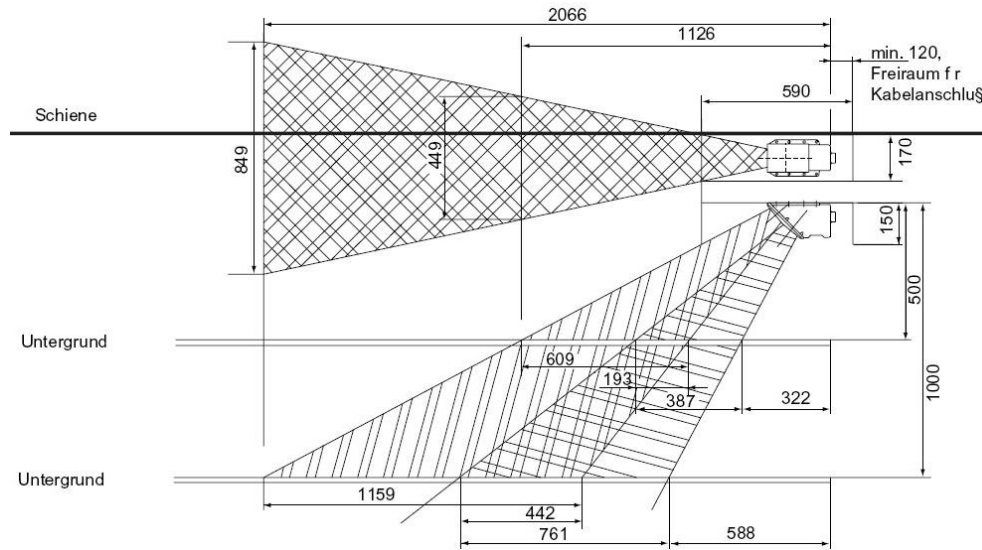


Abbildung 7-3 Einbauspezifikation von Dopplerradar DRS05 [Deuta 2005]

## 7.2 Punktuelle Positionserfassung mittels des RFID Systems

Das RFID-System (siehe Abschnitt 3.4.3.1) erfüllt die Kalibrierungs- und Gleisselektivitätsaufgaben für das Referenzmesssystem. Neben den Genauigkeitsmerkmalen solcher Systeme sind weitere Eigenschaften (z.B. Sendefrequenz, Betriebstemperaturbereich, IP-Schutzklasse usw.) zu berücksichtigen. Die geforderte Genauigkeit in Längsrichtung beträgt für den Test der DemoOrt-Applikation (siehe Kapitel 5) bis zu 50 cm [DIN1319-3 1996]. Das bedeutet, dass die von der Antenne des Lesegerätes abgestrahlte Keule (siehe Abbildung 7-4) oder auch die Überlappung von zwei Keulen bei der Anwendung mehrerer Antennen nebeneinander im Durchmesser nicht größer als 50 cm sein darf, da sonst die geforderte Genauigkeit nicht erfüllt werden kann. Weil der Durchmesser der abgestrahlten Keule mit der Entfernung von der Antenne wächst, ist es außerdem notwendig, zu spezifizieren, wo die Antenne am günstigsten befestigt werden kann und welcher Öffnungswinkel der Antenne benutzt werden sollte [Baumer Ident 2003].

Eine einfache trigonometrische Funktion besagt, dass der Tangens eines Winkels  $\alpha$  in einem rechtwinkligen Dreieck genau so groß ist wie das Verhältnis von Gegenkathete zu Ankathete. Aus der Strahlungskeule der Antenne ist es möglich, zwei rechtwinklige Dreiecke zu konstruieren und damit auch die Länge der Kontaktstrecke zu berechnen.

$$l = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot a \cdot 2 \quad (7-1)$$

In der folgenden Tabelle werden Antennen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln miteinander verglichen.

**Tabelle 7-1 Kontaktlängen in Abhängigkeit des Abstands von Antenne zum Datenträger**

Abstand (a) Antenne zur Datenträgerebene [m]	Kontaktlänge (l) bzw. Durchmesser der Keule [m] für Antennenöffnungswinkel $\alpha$		
	27°	60°	120°
0,2	0,096	0,231	0,693
0,4	0,192	0,462	1,386
0,6	0,288	0,693	2,078
0,8	0,384	0,924	2,771
1	0,48	1,155	3,464

Bei der Wahl der Antennen ist die Einbauhöhe sowie die geforderte Messunsicherheit zu berücksichtigen. Tabelle 7-1 enthält nur berechnete Werte. Im realen Umfeld ist es unmöglich, solche klaren Eigenschaften des RFID-Systems zu erreichen, und aus diesem Grund ist es notwendig, die empirischen Werte zu betrachten. Diese können gegenüber den berechneten Werten relativ stark variieren [Baumer Ident 2003; Zhou 2006; Maljuk 2006].

**Abbildung 7-4 RFID-Transponder (Links), RFID-Antenne (Mitte) und RFID-Transponder an der Strecke (Rechts)**

Des Weiteren muss die sogenannten Kontaktzeit (Kommunikationszeit für die Informationsübertragung) für unterschiedliche Geschwindigkeiten und auch unterschiedliche Kontaktlängen berücksichtigt werden. In der Tabelle 7-2 wird die Kontaktzeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Messplattform dargestellt.

$$t = \frac{s}{v} \quad (7-2)$$

**Tabelle 7-2 Kontaktzeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit**

Geschwindigkeit [km/h]	Kontaktzeit (ms) für die Kontaktlängen			
	0,35m	0,5m	0,75m	1m
5	252	360	540	720
10	126	180	270	360
20	63	90	135	180
40	31,5	45	67,5	90
80	15,8	22,5	33,8	45
120	10,5	15	22,5	30

Die Kommunikation zwischen den Datenträgern und der RFID-Kommunikationseinheit erfolgt in Kommunikationsslots. Dabei sendet die Zentraleinheit als erstes ein Signal. Dieses

Signal beinhaltet die ID der Kommunikationseinheit. Alle Datenträger (siehe Abbildung 7-4) die dieses Signal empfangen suchen sich einen Slot und übertragen ihre Daten in diesem Slot. Die Slotdauer beträgt 1,2 ms [Baumer Ident 2003].

## **7.3 Digitale Karte**

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Sensoren und deren Signalgewinnung wie auch die Signalverarbeitung erklärt. Als eine Schnittstelle zwischen der Sensorinformation und der Ortungsinformation ist eine digitale Karte zu nennen. Neben der Entstehung und deren Anforderungen an die digitale Karte wird auch auf die unterschiedlichen Komponenten, die für die digitale Karte benötigt werden und deren Zusammenhang zueinander eingegangen [Barbu 2008a; Bikker, Schroeder 2002].

Bei der digitalen Karte handelt es sich um gespeicherte Ortsinformationen, die strukturiert digital vorliegen und damit von einem Rechner abgerufen und auch verarbeitet werden können [Geistler 2006; Schmidt, Winter 2000; Böhringer 2008].

### **7.3.1 Zweck der digitalen Karte**

Sinn und Zweck einer digitalen Karte ist in erster Linie die Gewinnung einer absoluten Ortungsinformation aus einer relativen Ortungsinformation. Die in früheren Abschnitten vorgestellten Sensoren liefern zum größten Teil nur eine relative Ortungsinformation (Abstand vom letzten bekannten Punkt). Erst mit Hilfe der digitalen Karte ist es möglich die absolute Positionsinformation zu ermitteln [Böhringer 2008].

### **7.3.2 Anforderungen an die digitale Karte**

Es werden wesentliche Streckendaten in einer digitalen Karte gespeichert. Dies können Weichen, Abschnittlängen oder andere charakteristische Punkte sein [Geistler 2006]. Die genaue Aufteilung und die Art der Daten, die in der digitalen Karte abgelegt sind, wird in den nächsten Abschnitten benannt. Für die Migrationsaspekte ist es notwendig, die Möglichkeit zu haben, die gespeicherten Daten auch später korrigieren oder ergänzen zu können. Ebenso besteht die Notwendigkeit, den Zugriff auf die in der digitalen Karte gespeicherten Daten von einer externen Stelle zu ermöglichen. Außerdem muss eine digitale Speicherung vollständig sein und darf keine Fehler enthalten. Darüber hinaus muss die Zuverlässigkeit der digitalen Karte sichergestellt werden. Die genaue Aufteilung der unterschiedlichen Typen von digitalen Karten ist [Klinge 1998; Leinhos 1996; Geistler 2006] zu entnehmen.

### **7.3.3 Streckeneinteilung**

In der ersten Phase ist es erforderlich die vollständige Anforderungsanalyse mit der Unterstützung von Werkzeugen durchzuführen. Die grundsätzlichen Aufgaben und notwendigen Komponenten der Karte müssen im Vorfeld festgestellt werden. In erster Linie muss geklärt werden, woraus die digitale Karte bestehen soll.

Das Verfahren bei dem die Daten, die auf der digitalen Karte gespeichert sind, mit den gemessenen Daten auf diese Weise verglichen werden, nennt man *Network Following*. Dabei wird von einem gegebenen Referenzpunkt die gefahrene Strecke verfolgt. Ferner ist es



wichtig, eine einfache aber trotzdem relativ genaue Karte der Strecke zu erstellen [Maljuk 2006].

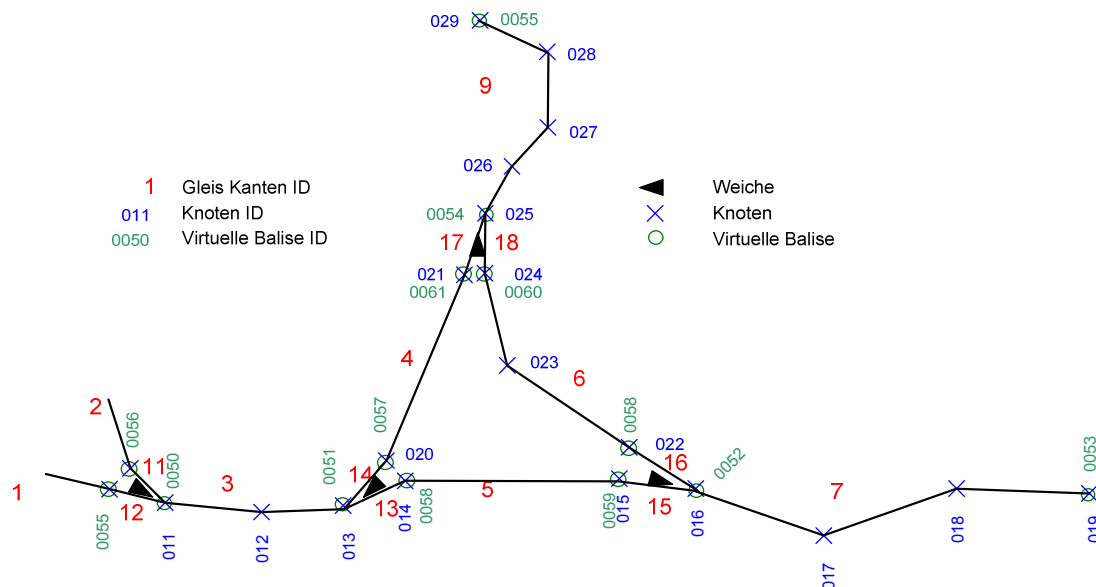
Da es sehr aufwendig ist, die gesamte Topographie der Strecke abzubilden, wird eine Vereinfachung vorgenommen. An jedem Verzweigungspunkt definiert man einen Knoten und zwischen den einzelnen Knoten wird lediglich eine lineare Kante eingesetzt. Diese topologische Abbildung einer Strecke ist einfach aber trotzdem noch ausreichend, um alle Bewegungen der Messplattform nachvollziehen zu können.

Da zwischen den einzelnen Verzweigungspunkten auch Kurven und Steigungen vorliegen, führt dies dazu, dass es zwischen den geographischen Punkten der Strecke und der topologischen Abbildung dieser Punkte in der Karte eine zum Teil sehr große Abweichung geben kann. Daher werden die einzelnen Kanten noch unterteilt, indem man auch zwischen den Verzweigungspunkten weitere Punkte mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Transponder eindeutig definiert. Die digitale Karte ist in vier unterschiedliche Komponenten unterteilt:

- Knoten
- Virtuelle Balise
- Kante
- Gleiskante

Die virtuelle Balise entspricht dabei einem Verzweigungspunkt und eine Gleiskante einer linearen Kante. Die Knoten sind zusätzliche geographisch eindeutig definierte Punkte. Zwischen den Knoten befinden sich die Kanten.

In der Abbildung 7-5 wird die Unterteilung der Strecke in die vorher genannten Komponenten deutlich dargestellt und erläutert. Die Abbildung zeigt nicht die vollständige Strecke, sondern nur einen erdachten Streckenabschnitt, in dem alle im Betrieb möglichen Zugbewegungen dargestellt werden können.

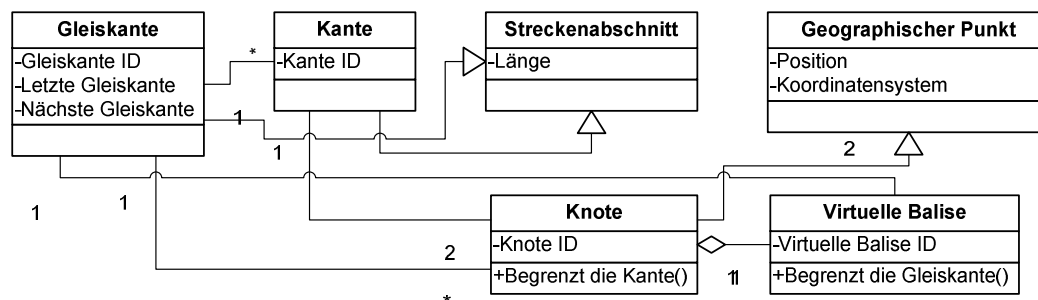


**Abbildung 7-5 Teilstück der Strecke (topographische Sicht)**

Im Rahmen einer besseren Gleiszuordnung werden die virtuellen Balisen nicht direkt in der Weiche definiert. Tatsächlich werden drei Knoten um die Weiche angelegt. Dies führt zwar dazu, dass im Bereich der Weiche keine eindeutige Positionsbestimmung der Messplattform stattfinden kann, dafür ist es einfacher, beim herausfahren aus der Weiche die Gleisselektivität festzustellen.

Die Knoten und die virtuellen Balisen begrenzen die Streckenabschnitte. Die Gleiskanten werden von den virtuellen Balisen und die Kanten von den Knoten begrenzt. Es fällt auch auf, dass die Position jeder virtuellen Balise der Position eines Knotens entspricht. Aber nicht jeder Knoten ist auch an derselben Position wie die virtuelle Balise. Außerdem wird noch deutlich, dass eine Gleiskante aus mindestens einer Kante besteht. Die Summe der Kantenlängen entspricht der Länge einer Gleiskante [Maljuk 2006].

Diese Zusammenhänge zwischen den Kanten, Knoten, Gleiskanten und virtuellen Balisen wird im folgenden Klassendiagramm besonders deutlich abgebildet.



**Abbildung 7-6 Klassendiagramm der Streckenstruktur**

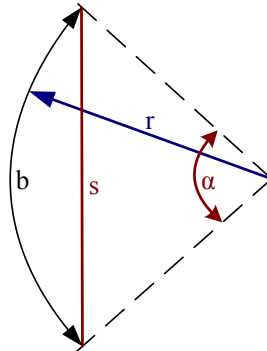
Aus diesem Klassendiagramm wird deutlich, dass jede virtuelle Balise bis auf die ID die gleichen Eigenschaften wie ein Knoten besitzt. Der Knoten wiederum hat die gleichen Eigenschaften wie ein geographischer Punkt, mit der einzigen Ausnahme, dass er noch zusätzlich eine Knoten-ID besitzt. Gleiche Vererbungsstrukturen findet man zwischen dem Streckenabschnitt und der Kante wie auch zwischen dem Streckenabschnitt und der Gleiskante. Die Kante besitzt wie der Streckenabschnitt eine Länge aber noch zusätzlich eine Kanten-ID mit der eine eindeutige Zuordnung einer bestimmten Kante sofort möglich ist. Die Gleiskante besitzt ebenfalls eine Länge wie auch die Informationen über die direkt folgende und die letzte durchgefahrene Gleiskante. Aus dem Diagramm geht auch hervor, dass eine Kante immer zwei Knoten, welche sich an den Enden der Kanten befinden, beinhaltet und eine Gleiskante zwei virtuelle Balisen, die die Gleiskante begrenzen, sowie beliebig viele Knoten und Kanten beinhalten kann.

Die Gleiskanten können beliebig viele Kanten und damit auch beliebig viele Knoten enthalten. Auch die Länge der Kanten ist beliebig und damit ebenso der Abstand der einzelnen Knoten voneinander. Die Begrenzung der Entfernung zwischen zwei Knoten hängt von zwei Faktoren ab:

- Der Krümmung der Strecke (Messunsicherheit quer zur Fahrtrichtung) und
- die Messunsicherheit des Radars (Messunsicherheit längs zur Fahrtrichtung).

Da die digitale Karte nicht mit topologischen Daten arbeitet und zwischen den beiden Knoten nur eine Gerade nachgebildet werden kann, ist es möglich, dass bei einem kleineren Radius

und einer großen Distanz zwischen den Knoten die Entfernung zwischen tatsächlicher Strecke und der Sekante eine zum Teil große Abweichung entsteht. Folgende Abbildung verdeutlicht die dabei entstehende Ungenauigkeit.



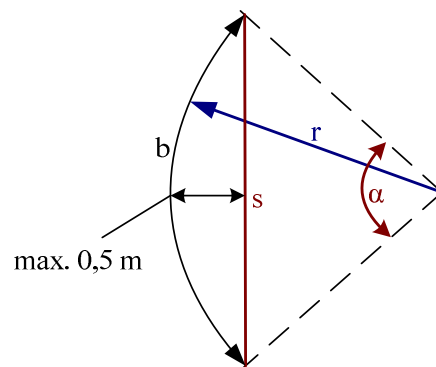
**Abbildung 7-7 Fehlerursache für die Messunsicherheit in Längsrichtung**

In der folgenden Tabelle werden die Abstände zwischen den Knoten in Abhängigkeit des Radius der Strecke so gewählt, dass die Länge des Bogens der Strecke und der Sekante eine maximale Abweichung von 0,5 m nicht überschreitet. Bei dieser Berechnung wurde angenommen, dass die Kurve der Strecke kreisförmig ist.

**Tabelle 7-3 Abstand zwischen zwei Datenträgern in der Kurve**

Winkel $\alpha$	$\alpha/2$	$\sin(\alpha/2)$	$1/r$	$r$ [m]	$b$ [m]
10	5	0,08716	0,00044	2257,89	394,077
15	7,5	0,13053	0,00149	669,34	175,23
20	10	0,17365	0,00354	282,56	98,63
30	15	0,25882	0,01192	83,88	43,92
40	20	0,34202	0,02818	35,48	24,77
50	25	0,42262	0,05486	18,22	15,9
60	30	0,5	0,0944	10,59	11,09

Die Querabweichung zwischen der Strecke  $b$  und der Sekante  $s$  ist in Abbildung 7-8 zu sehen.



**Abbildung 7-8 Fehlerursache für die Messunsicherheit in Querrichtung**

In der folgenden Tabelle werden die Abstände zwischen den Knoten in Abhängigkeit des Radius der Strecke so gewählt, dass zwischen dem Bogen der Strecke und der Sekante eine

maximale Abweichung von 0,5 m nicht überschritten wird. Bei dieser Berechnung wurde angenommen, dass die Kurve der Strecke kreisförmig ist.

**Tabelle 7-4 Abstand der Datenträger in Abhängigkeit des Radius der Kurve**

Radius [m]	Bogenmaß [m]
50	14,15
100	20
200	28,28
400	39,98
1000	63,22
1500	77,42

Bei den geraden Abschnitten der Strecke ist die Genauigkeit des Mikrowellensensors für die Längen der Kanten entscheidend. Da der Fortpflanzungsfehler des Mikrowellensensors bis 0,2% betragen kann [Deuta 2005], muss man die Länge der Kanten auf den geraden Abschnitten auf 250 m begrenzen, um die Genauigkeit beizubehalten.

### 7.3.4 Elektronische Streckenkarte im standardisierten XML-Format

Eine XML-(Extensive Markup Language) Datei enthält im Wesentlichen Daten, die in einer Baumstruktur angelegt werden. Die Struktur dieser Daten wird mit Hilfe der DTD (Document Type Definition) beschrieben. Die DTD beschreibt die möglichen Elemente und deren Attribute, die in der XML-Datei vorkommen dürfen. Die Reihenfolge mit der die Elemente in der DTD beschrieben werden, ist nicht entscheidend, sie muss jedoch vollständig sein [Behme, Mintert 2000; Eckstein, Eckstein 2004].

Mit Hilfe einer DTD wird die Struktur von XML-Dokumenten verbindlich und zentral festgelegt. Alle XML-Dokumente desselben Typs können anhand derselben DTD bezüglich ihrer Struktur geprüft werden. Viele XML-Editoren und andere XML-verarbeitende Tools können eine solche Prüfung auf Wunsch automatisch vornehmen [Bray 1998].

Trotz aller Vorteile, die die DTD mit sich bringt, ist die Benutzung von DTDs nicht immer selbstverständlich. XML-Dokumente lassen sich auch ohne zugehörige DTD erstellen und verarbeiten. DTDs kann man insofern als eine optionale aber nutzbringende Zusatztechnik betrachten. Außerdem ist einer der bedeutendsten Vorteile die strikte Trennung zwischen Struktur, Inhalt und Format. Durch diese Trennung wird die Arbeit mit Informationen flexibler, effizienter und auch einfacher [Bray 1998; Eckstein, Eckstein 2004].

Die Erstellung einer digitalen Karte wird mit Hilfe der XML realisiert. Es lassen sich beliebig komplexe Strukturen mit beliebigen Tag- und Attributnamen erstellen. Eine DTD (siehe Abbildung 7-9) hilft dabei, die Struktur und den genauen Aufbau von XML-Dokumenten verbindlich festzulegen.

Für eine effiziente Arbeit und eine Analyse der topologischen Daten der Zugstrecke war es notwendig, ein Werkzeug zu entwickeln, welches automatisch eine elektronische Streckenkarte generiert. Ein benutzerfreundliches Interface ermöglicht es, alle spezifischen Anforderungen, wie die maximale und minimale Distanz zwischen den Transpondern, maximale Längenunterschiede und maximale Positionsunterschiede zwischen der realen und der

topographischen Sicht auf die Strecke zu definieren. Dieses Werkzeug unterstützt die Arbeit in drei Phasen des gesamten Generierungsprozesses. In der ersten Phase werden die geographischen Streckendaten analysiert und auf der Basis der Spezifikationen wird daraufhin die Verteilung der Transponder entlang der Strecke berechnet. In der zweiten Phase werden verwandte Teile der Strecke ausgewählt und eine XML-basierte elektronische Streckenkarte wird in der dritten Phase generiert.

```
<Strecke>
  <Gleiskante Id="3" GleiskanteLaenge="1500" n1-GleiskanteID="4" n2-GleiskanteID="5" v1-
    GleiskanteID="1" v2-GleiskanteID="2" >
    <Kante Id="31" Laenge="800">
      <Knoten KnotenId="011" Abstand="0" PositionLongitud="135"
        PositionLatitud="43" PositionAltitud="654"/>
      <Knoten KnotenId="012" Abstand="800" PositionLongitud="135"
        PositionLatitud="44" PositionAltitud="698"/>
    </Kante>
    <Kante Id="32" Laenge="700">
      <Knoten KnotenId="012" Abstand="800" PositionLongitud="135"
        PositionLatitud="44" PositionAltitud="698"/>
      <Knoten KnotenId="013" Abstand="1500" PositionLongitud="136"
        PositionLatitud="43" PositionAltitud="712"/>
    </Kante>
    <VirtuelleBalise BaliseID="0050" KnotenId="011"/>
    <VirtuelleBalise BaliseID="0051" KnotenId="013"/>
  </Gleiskante>
```

Abbildung 7-9 Auszug von der XML-basierte elektronische Streckenkarte

## 7.4 Positionsbestimmung im Referenzmesssystem

Die Sensorfusion steht für die Verarbeitung der Messwerte von mehreren Sensoren. Dabei sind es beim Referenzmesssystem die Daten der RFID-Transponder, des Mikrowellensensors, wie auch die Daten der elektronischen Karte. All diese Daten werden einem Industrierechner über Schnittstellen zur Verfügung gestellt [Poliak et al. 2006d, Poliak et al. 2006i].

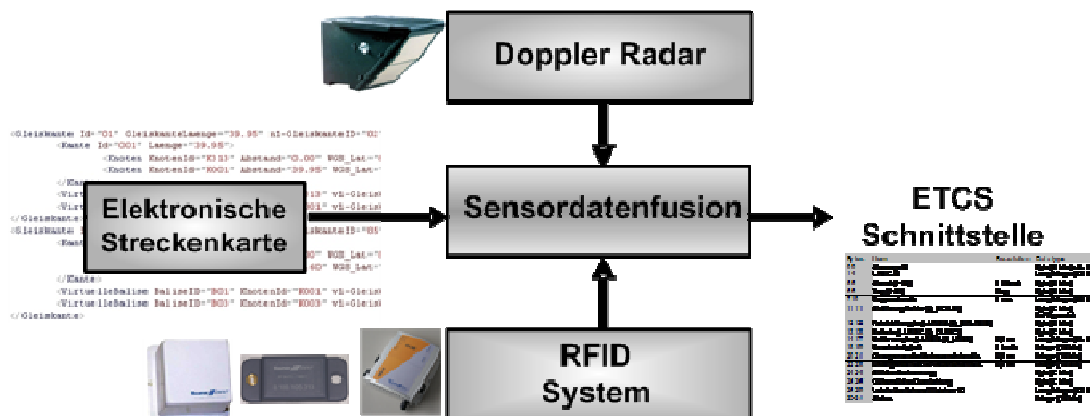
Die Positionsinformation wird im ETCS-Format (ETCS-Positionstelegramm) in regelmäßigen Zeitintervallen übermittelt. Die Positionsinformation wird als relative Positionsangabe dargestellt. Die folgende Tabelle beschreibt die Ausgangsschnittstelle des Referenzmesssystems.

Neue Technologie verlangt es, neueste Standards und Vorschriften zu nutzen, was ein wichtiger Aspekt bei der Wahl der Positionsdatenstruktur war. Hier wurde das ETCS-System als Maßstab genommen [SUBSET 2002; RailOrt 1998].

**Tabelle 7-5 Definition der Ausgangsschnittstelle des Referenzmesssystems nach [SUB-SET 2002]**

Start Byte	Datenfeld	Auflösung	Datentyp
0	Message-ID		Byte (8 bits) z.B. 1
1	LRBG ID		Long Integer (32 bits)
5	Monat (1-12)	1 Monat	Byte (8 bits)
6	Tag (1-31)	Tag	Byte (8 bits)
7	Tagessekunde	1 ms	Long Integer (32 bits)
11	Skalierungsfaktor (Q_SCALE)		Byte (8 bits) (auf 0 gesetzt)
12	Fahrtrichtung bzgl. LRBG (Q_DIRLRBG)		Byte (8 bits)
13	Seite bzgl. LRBG (Q_DLRBG)		Byte (8 bits)
14	Entfernung bzgl. LRBG (D_LRBG)	0,1 m	Long Integer (24 bits)
18	Geschwindigkeit	1 km/h	Integer (16 bits)
20	Obergrenze des Vertrauensintervalls	0,1 m	Integer (16 bits)
22	Untergrenze des Vertrauensintervalls	0,1 m	Integer (16 bits)
24	Stillstandserkennung		Byte (8 bits)
25	Gütemaß der Querrichtung		Byte (8 bits)
26	Letzte überfahrene Weichen-ID		Long Integer (32 bits)
30	Status		Integer (16 bits)

Bei Einsatz einer solchen Referenzmessplattform zur Qualifizierung und Validierung anderer Arten von Positionssystemen ist zu berücksichtigen, in welchem Format und welcher Form die Positionsinformation von beiden Systemen dargestellt wird [Poliak et al. 2006f].

**Abbildung 7-10 Struktur der Sensordatenfusion**

Dieses komplexe Referenzmesssystem benötigt ein Kontrollzentrum (siehe Abbildung 7-11) für die Überwachung der Visualisierung des Referenzmessprozesses. Mithilfe einer Online-Kommunikation zwischen dem Bereich der Referenzmessplattform und dem Kontrollzentrum wird der Datenaustausch basierend auf GPRS-Kommunikation und W-LAN-Zugängen bei den Bahnhöfen durchgeführt [Poliak et al. 2006e].

Dieses Kontrollzentrum (siehe Abbildung 7-11) wird derzeit in der Versuchshalle des Institutes für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität in Braunschweig errichtet. Es wurde allerdings auf leichte Transportierbarkeit hin entworfen, damit es in einen standardisierten mobilen Container verladen und in die Nähe der Teststrecke

transportiert werden kann, was den Betrieb des Systems vor Ort erleichtert.



Abbildung 7-11 Kontrollzentrum für die Visualisierung des Referenzmessprozesses

## 7.5 Messgelände

In den folgenden Abschnitten werden drei Messgelände (siehe Tabelle 7-6) kurz vorgestellt und deren Spezifika erläutert. Die Messgelände wurden anhand der Analyse von Anforderungen an die Testszenarien ausgesucht. Das Spektrum der Anforderungen ist so groß, dass es nicht möglich war nur ein Messgelände zu aussuchen, welche allen Anforderungen entspricht.

Tabelle 7-6 Messgelände im Vergleich

Merkmal	VBV Braunschweig	AVG Karlsruhe	Tatrabahn Poprad
Länge	1,6 km	29,7 km	28,2 km
Max. Geschwindigkeit	25 km/h	80 km/h	60 km/h
Anzahl RFID Transpondern	54	306	327
Tunnel/Brücke	Nein/ Nein	Nein/Ja	Nein/Ja
Höhenunterschied	2 m	130m	400 m
Anzahl Bahnhöfen	0	9	8
Anzahl Weichen	8	44	29

### 7.5.1 VBV Braunschweig

Die erste Teststrecke wurde mit diesem Referenzmesssystem ausgerüstet. Sie befindet sich in der Nähe des Braunschweiger Hauptbahnhofs. Die Streckenlänge beträgt etwa drei Kilometer und sie beinhaltet acht Weichen, gerade Abschnitte und Kurven. Zudem eignet sich die topographische Konstellation für Tests der Gleisselektivität. Die topographische Konstellation mit einer Brücke und einem großen Fabrikgebäude in der Nähe der Strecke liefert Orte mit kritischen Empfangsbedingungen der Satellitensignale. Daher ist sie gut geeignet, die Genauigkeit und Verfügbarkeit für sicherheitsbezogene Anwendungen im Bereich der Zugführung zu testen.

## **7.5.2 AVG Karlsruhe**

Die zweite Teststrecke mit einer Länge von etwa 30 km befindet sich in Großraum Karlsruhe. Diese Teststrecke kann man mit komplizierten Bahnhofsbereichen sowie langen parallelen Gleisabschnitten vergleichen. Hierfür wurden Testszenarien spezifiziert, mit welchen man die Gleiselektivitätseigenschaften sowie Verhalten bei höheren Geschwindigkeiten prüfen und nachweisen kann.

## **7.5.3 Tatrabahn Poprad**

Die dritte ausgerüstete Strecke mit dem Referenzmesssystem befindet sich in Großraum Vysoké Tatry in der Slowakischen Republik. Diese wurde wegen der kritischen und extremen GNSS-Umgebungsbedingungen (siehe Abbildung 8-1) ausgewählt. Die komplizierte und anspruchsvolle topologische Gleisführung mit großen Höhenunterschieden und engen Kurvenradien eignet sich ausgezeichnet für die Validierung GNSS basierter Anwendungen unter dynamischen Randbedingungen. Hier eingesetzte neue Triebfahrzeuge bieten ebenso Möglichkeiten dynamische Testanforderungen zu prüfen und nachzuweisen [Lichner 2004].

## **7.6 Zusammenfassung**

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Sensoreigenschaften wurde das Dopplerradar zur Geschwindigkeitsmessung und RFID-System für absolute Ortung genutzt. Diese Kombination von verschiedenen unabhängigen Sensoren bietet die geforderte Redundanz, Genauigkeit und Diversität für ein Referenzmesssystem.

In den vorherigen Abschnitten wurde das Referenzmesssystem (GaTRail) ausführlich vorgestellt und dessen Aufbau sowie verwendete Messsensoren erläutert. Das Gesamtkonzept erfüllt seine spezifizierten Anwendungsanforderungen und wurde zu Validationszwecken auf drei Teststrecken in Europa angewendet. Einige der erreichten Messergebnisse werden im folgenden Kapitel erläutert.

Für eine aussagekräftige Auswertung muss das Referenzmesssystem eine mindestens um eine Größenordnung geringere Messunsicherheit aufweisen, als das zu bewertende Objekt, der GNSS-Empfänger. Um Fehler in der Ermittlung der Referenzposition zu vermeiden, ist es außerdem von Vorteil, diese auf einem anderen Weg als über die Nutzung von Satellitenortung (wie beim Messobjekt) zu ermitteln.



# 8 Messergebnisse und deren Interpretation

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden in den letzten Jahren drei Teststrecken (siehe Abschnitte 7.5.1, 7.5.2 und 7.5.3) mit dem Referenzmesssystem ausgerüstet.

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse einer Testfahrt auf der Strecke der Tatrabahn beschrieben. Diese Strecke befindet sich im nördlichen Teil der Slowakische Republik zwischen den Gebirgen Hohe und Niedrige Tatra. Der Höhenunterschied zwischen der Anfangsstation Poprad und Endstation Štrbské Pleso beträgt mehr als 600 Meter, und das bei einer Entfernung von 28,8 km.

Wie schon in Abbildung 8-1 zu sehen ist, eignet sich diese Teststrecke mit ihrer schwierigen Umgebung für Tests GNSS basierter Anwendungen. Ein Großteil der Strecke führt durch Waldgebiete, die Gebäude sind sehr nah an der Strecke und dienen als Reflektoren für das GNSS-Signal. Des Weiteren sind hier Streckenelemente wie Brücken und Unterführungen typisch. Obwohl die GNSS-Antenne auf dem Dach des Fahrzeuges aufgebaut ist und ein hochwertiger GNSS-Empfänger eingesetzt ist, beträgt die GNSS-Positionsverfügbarkeit in der Regel 85% der Messungen.



Abbildung 8-1 Typische Umgebungsmerkmale der Teststrecke Tatrabahn

## 8.1 Testszenarien

Die Zielinformationen von GNSS-Systemen sind üblicherweise aus den Pseudostrecken abgeleitete Positionen im dreidimensionalen Raum. Diese werden nicht direkt als primäre Messgröße bestimmt, sondern durch eine Parameterschätzung im Rahmen einer Ausgleichsrechnung ermittelt.

Das Auswertungsergebnis wird vom GNSS-Empfänger ausgegeben, z.B. Position, Geschwindigkeit und Richtung. Zusätzlich kann der Empfänger auch eine Standardabweichung für diese Werte bestimmen. Wiederholbedingungen sind ein sehr wichtiger Aspekt für die Vergleichbarkeit von Messungen.

Bei GNSS-Messungen stellt sich das grundsätzliche Problem, dass die verschiedenen, systematisch wirkenden Einflüsse unterschiedliche Periodendauern und Amplituden annehmen können. Deshalb ist es schwierig, die Messbedingungen genau zu wiederholen. Fehler können durch Defekte einzelner Satelliten, Veränderungen in der Ionosphäre, Mehrwegeeffekte usw. hervorgerufen werden. Ein idealer Fall ist möglich, wenn man mit einem GNSS-

Signalgenerator getestet. Der Generator sendet ein simuliertes SIS, das immer derselben Konstellation entspricht. Damit können in diesem speziellen Fall optimale Wiederholbedingungen ermöglicht werden.

Bei dem Test mit realen Umgebungsbedingungen ist es nötig, festdefinierte Testszenarien zu entwickeln und schließlich beim Validationsprozess zu berücksichtigen. Dies geschieht bisher noch mit aufwendigen Verfahren, bei denen die Umgebungsbedingungen nur empirisch klassifiziert werden [Becker et al. 2008].

Für definierte Validationsanforderungen muss man passende Szenarien oder Kombination solcher entwickeln, sodass die Validationsbedingungen den Anforderungen, welche in der Anforderungsliste (siehe Abschnitt 0) festgelegt wurden, entsprechen.

### **8.1.1 Einflüsse der Umgebung auf die Testsszenariendefinition**

Eine Vielzahl an Komponenten und Einflüssen haben Auswirkungen auf das Ergebnis einer Positionsbestimmung mittels GNSS-Systemen. Eine eindeutige Trennung in der Zuordnung zum Prüfling oder zu den Prüfbedingungen ist nicht durchgängig schlüssig möglich. Bei der Durchführung eines Tests können nicht alle Einflüsse bis zur vernachlässigbaren Signifikanz minimiert werden. Deshalb soll die Messumgebung klassifiziert werden, sodass unter gleichen Klassen der Umgebung die Ergebnisse bei verschiedenen Tests vergleichbar werden (Fuhlbrügge, 2004).

Diese Einflüsse können in drei Gruppen eingeordnet werden:

- GNSS-System „Signal in Space“
- Atmosphäre
- Lokale Einflüsse

### **8.1.2 Untersuchung am unbewegten Empfänger**

Bei Untersuchungen am unbewegten Empfänger besteht die Möglichkeit, neben einer äußerst genau bestimmbaren Referenzposition, den Einfluss der Variation der Umgebungsbedingungen, insbesondere der Satellitenkonstellation, auf die Genauigkeit zu ermitteln (siehe Abschnitt 4.8.5). Die Auswertung der erhaltenen Messwerte kann mit vielfältigen statistischen Mitteln oder Methoden durchgeführt werden, da diese insbesondere für statische Messungen ausgelegt sind.

Die Empfangsbedingungen können für diese Untersuchung optimal gewählt werden, indem beispielsweise das Dach eines hohen Gebäudes als Antennenstandort benutzt wird.

### **8.1.3 Untersuchungen am bewegten Empfänger**

Das Ziel dieses Tests ist, die Genauigkeit im dynamischen Fall festzustellen. Bei bewegtem Empfänger treten allerdings Effekte in Erscheinung, die im statischen Fall nicht vorhanden sind. Die zeitliche Variation der lokalen Empfangsbedingungen ist größer, je höher die Geschwindigkeit ist. Zudem wird die Genauigkeit bei höheren Geschwindigkeiten von der

Verarbeitungsgeschwindigkeit und der Datenrate des Empfängers begrenzt.

Auch hierbei wird, analog zur Untersuchung des unbewegten Empfängers, eine Referenzposition benötigt. Wenn diese dynamischen Untersuchungen unter Realbedingungen in einer praxisnahen Umgebung stattfinden, kann damit das Vertrauen der potentiellen Anwender in die Ergebnisse gesteigert werden.

## 8.2 Testfahrt

Für Auswertungszwecke wurde eine Fahrt am 6. Juni 2008 von Štrbské Pleso nach Poprad gewählt. Neben den kritischen Umgebungsbedingungen wurde für dieses Testszenario eine Fahrt durch die gleistopologisch anspruchsvollen Bahnhöfe (viele Weichen, Bahnhofbereiche mit parallelen Gleisen, usw.) gewählt. Während der Fahrt wurden auch längere Aufenthalte im Bahnhof mit vier parallelen Gleisen gemacht, so dass teilweise statische Messungen nachgebildet werden konnten. Während der 64-minütigen Messfahrt wurden 7557 GNSS-Positionsmessungen mit einer GNSS-Positionsverfügbarkeit von 87,48 % gemessen (mindestens vier sichtbare Satelliten). Die befahrene Strecke ist in Abbildung 8-2 zu sehen.

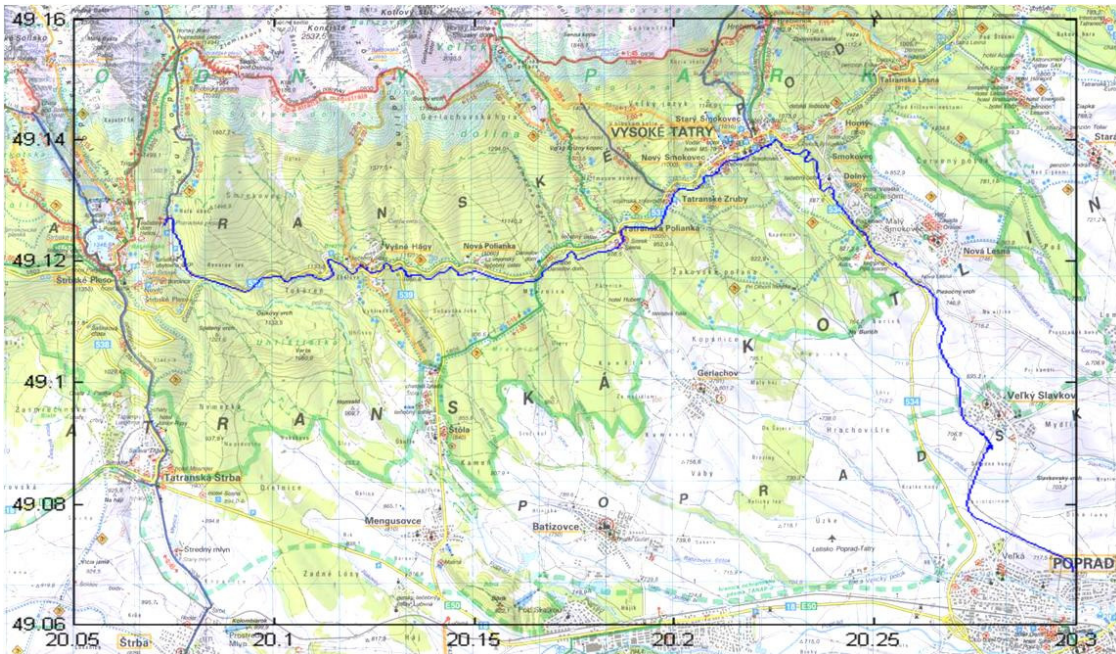


Abbildung 8-2 Testfahrt am 6. Juni 2008 von Štrbské Pleso nach Poprad (blaue Linie) [VKU 2004]

## 8.3 Sichtbare Satelliten während der Testfahrt

Die Tabelle 8-1 beschreibt die proportionale Verteilung der sichtbaren Satelliten während der Fahrt. Hier sind nur die Messwerte aufgelistet, wo die minimale Anforderung für die sichtbaren Satelliten für die Berechnung der GNSS-Position erfüllt ist.

**Tabelle 8-1 Proportionale Berechnung der sichtbaren Satelliten von allen Messungen**

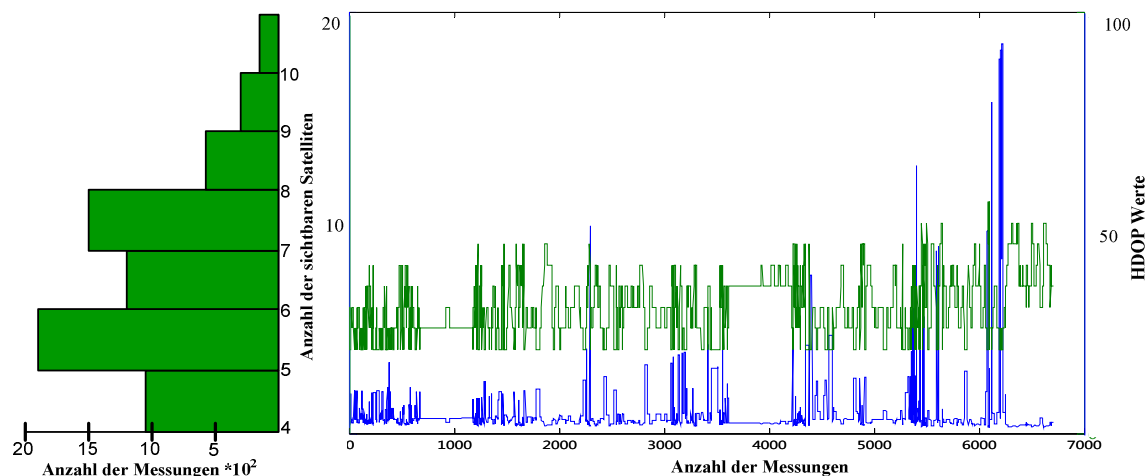
	Anzahl von sichtbaren Satelliten							
	4	5	6	7	8	9	10	11
Messwerte	1028	1886	1253	1499	654	293	98	5
Proportional [%]	13,57	24,89	16,54	19,78	8,63	3,87	1,29	0,07

Obwohl die GNSS Positionsverfügbarkeit unter den erwarteten Werten, welche von den statischen Messungen bekannt sind (siehe Abschnitt 4.8.5.1), liegen, wurden mehr als 50 % aller Messwerte von 6 und mehr sichtbaren Satelliten bestimmt.

Die Abbildung 8-3 illustriert die Sichtbarkeit von Satelliten während der Fahrt. Sehr häufig stehen für Positionsberechnung nur 4 oder 5 Satelliten zur Verfügung. Diese lokale Eigenschaft der Sichtbarkeit ändert sich während der Fahrt stark, was zu den lokalen Eigenschaften der Umgebung zählt. In der Mitte der Testfahrt hatte das Testfahrzeug eine längere Pause im Bahnhof Starý Smokovec. Zu dieser Zeit war die Sichtbarkeit den Satelliten relativ konstant (sieben Satelliten). Dieser Abschnitt der Messfahrt kann als statische Messung betrachtet werden, bei der die erreichte GNSS- Positionsverfügbarkeit 99,97 % beträgt.

## 8.4 HDOP Werte

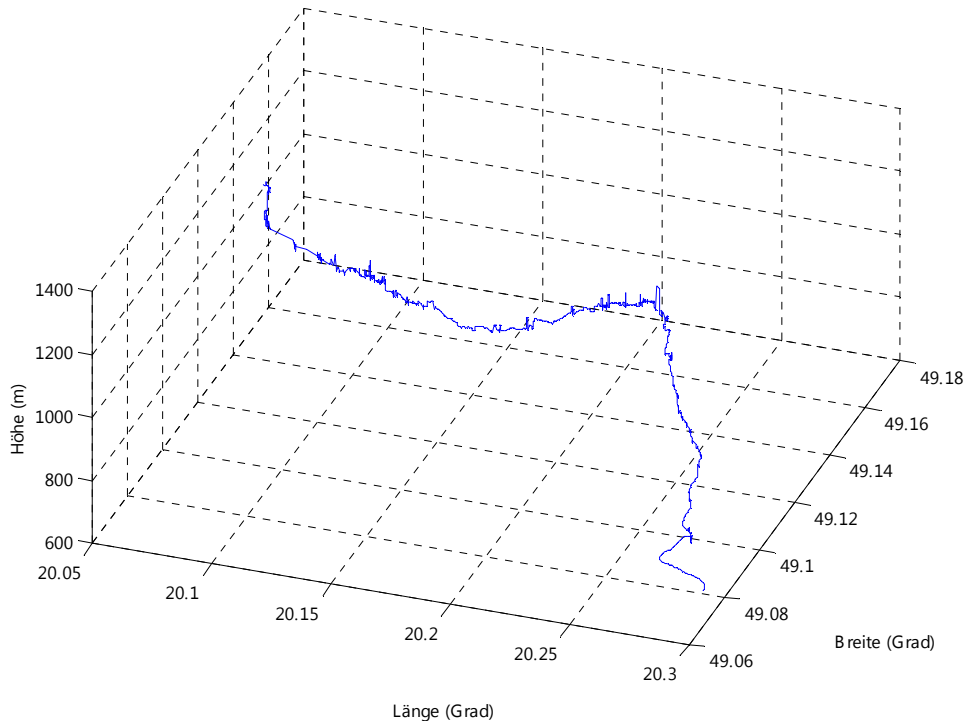
Die Qualität der GNSS Messungen kann man auch mit HDOP-Werten (siehe Abschnitt 4.8.5) zum Ausdruck bringen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 8-3 zu erkennen. Die blaue Linie illustriert den Verlauf des HDOP-Wertes. Für die analysierte Testfahrt liegt sie im Bereich zwischen 1 und 46.

**Abbildung 8-3 HDOP Werte und Anzahl der sichtbaren Satelliten**

Im Gegensatz zum statischen Fall (siehe Abschnitt 4.8.5.2), erreicht bei der exemplarischen Berechnung von ca. 7800 Messungen der Korrelationskoeffizient den Wert 0,394. Diese konkrete Messung kann die Hypothese dass ein relevanter Zusammenhang zwischen dem HDOP-Wert und der Anzahl der sichtbaren Satelliten während der dynamischen Messung zu erkennen ist, nicht bestätigen.

## 8.5 Position im Raum während der Testfahrt

Obwohl in mehr als 50 % aller Messungen die Positionsinformation von mehr als 6 Satelliten berechnet wurde, sieht das Abbild der Testfahrt (Abbildung 8-4) relativ ungenau aus und sehr viele markante Ausreißer sind zu erkennen.



**Abbildung 8-4 Verlauf der Teststrecke in dreidimensionalem Raum**

Dieses ist auf kritische Umgebungsbedingungen (siehe Abschnitt 7.5.3) und einen hochwertigen GNSS-Empfänger zurückzuführen, welcher die Positionsinformation ohne zusätzliche Filterung und Vorhersagealgorithmen berechnet. Dank solcher Empfänger ist die Validation von GNSS für sicherheitsrelevante Anwendungen möglich, weil das unverfälschte GNSS-Signal bewertet wird, ohne Einflüsse der Filtersoftware des GNSS-Empfängers.

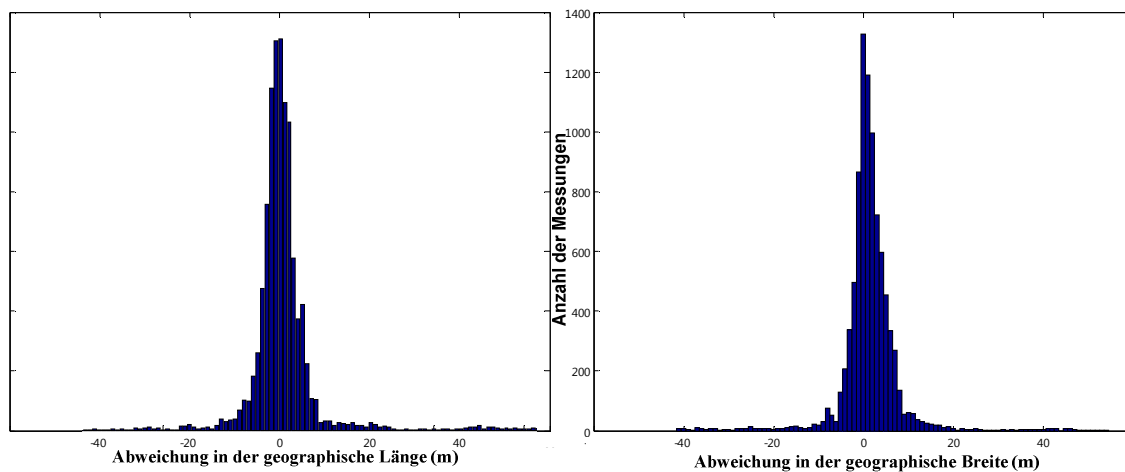
## 8.6 Messunsicherheit der Positionsbestimmung

In den vorherigen Abschnitten wurden die Messwerte des GNSS-Empfängers analysiert und illustriert. Für Validationszwecke ist es notwendig einen Vergleich durchzuführen zwischen den gemessenen Werten und korrekten Werten (siehe Abschnitt 6.1). Der komplette Validationsprozess beinhaltet mehrere vordefinierte und wählbare Anforderungen, welche dann in weiteren Schritten nachgewiesen werden müssen. Ein konkreter Fall ist die Messunsicherheit der Position eines GNSS-Empfängers während einer Fahrt. Für den Nachweis wurde ein typisches Testszenario für eine satellitenbasierte Ortungseinheit aus dem Eisenbahnbereich gewählt.

Abbildung 8-5 illustriert die Positionsungenauigkeit in der geographische Länge und Breite von einem GNSS-Empfänger. Als reale Position oder Referenzposition dient das Referenzmesssystem GaTRail, welches in Kapitel 7 ausführlich dargestellt wurde. Die Standardabweichung von der Positionsungenauigkeit der Länge liegt für diese konkrete Messung bei 9,12



Meter, wobei die Messwerte in einem Spektrum von 137 Metern liegen.



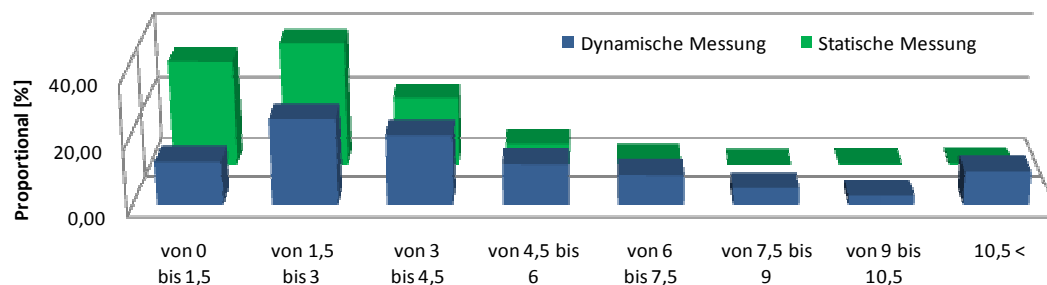
**Abbildung 8-5** Histogrammische Darstellung von Positionsabweichungen in der geographische Länge und Breite

Tabelle 8-2 beschreibt die proportionale Verteilung der absoluten Positionmessunsicherheit für die statische Messung und die Messung während den Fahrt (siehe Abschnitt 8.2). Hier sind nur die Messwerte mit einer maximalen Messungenauigkeit von weniger als 10,5 Metern aufgelistet.

**Tabelle 8-2** Absolute Positionsabweichung während der Testfahrt

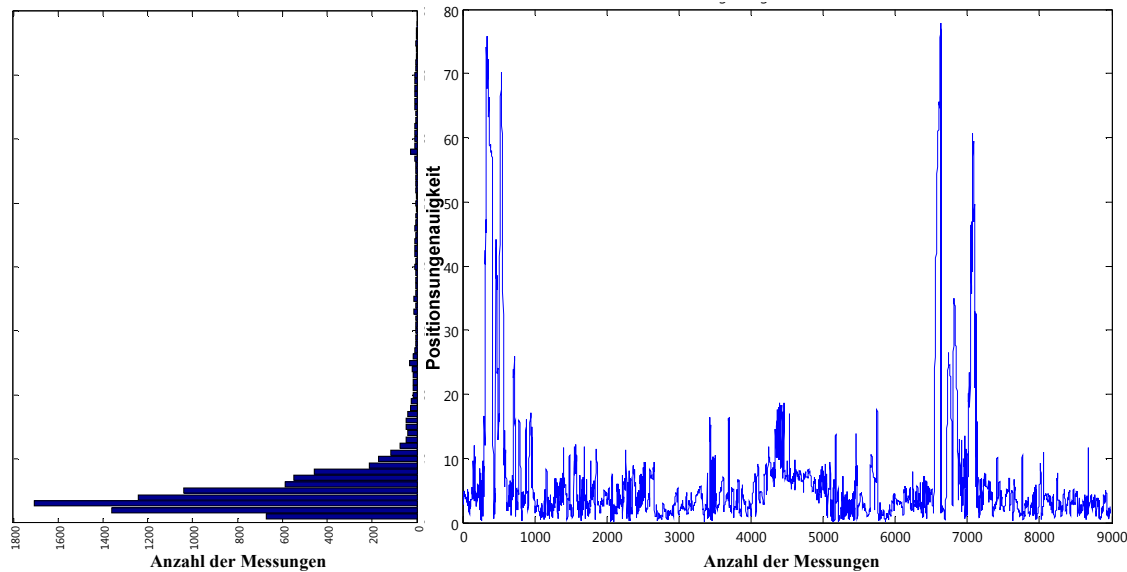
Absolute Positionsmessunsicherheit								
Messintervall [m]	von 0 bis 1,5	von 1,5 bis 3	von 3 bis 4,5	von 4,5 bis 6	von 6 bis 7,5	von 7,5 bis 9	von 9 bis 10,5	10,5 <
Proportional [%] für statische Messung	32,41	38,09	20,81	6,34	1,62	0,14	0,19	0,40
Proportional [%] für dynamische Messung	13,27	25,97	21,13	12,50	9,13	4,97	2,67	10,36

Bei mehr als 60% aller Messwerte der dynamischen Messung beträgt die Messunsicherheit weniger als 4,5 Meter (siehe Abbildung 8-6), und ungefähr 90% liegen unter 10,5 Metern, was man als angemessenen Ergebnis bezeichnen kann, wenn man die kritischen Umgebungsbedingungen berücksichtigt. Bei statischer Messung beträgt die Messunsicherheit weniger als 4,5 Meter für ca. 90% alle Messwerte.



**Abbildung 8-6** Messunsicherheit der Positionsbestimmung für statische und dynamische Messung

Abbildung 8-7 zeigt die absolute Positionsungenauigkeit während der Testfahrt. Es sind sehr leicht zwei kritische Bereiche zu erkennen. Bei diesen handelt sich um Bereiche, wo die Umgebungsbedingungen sehr kritisch waren. Die teilweise sehr große Messunsicherheit ist auf die Mehrwegausbreitung der GNSS-Signale zurückzuführen.



**Abbildung 8-7 Positionsungenauigkeit während der Testfahrt**

Diese lokale Eigenschaft der Messunsicherheit ändert sich während der Fahrt bedeutend (das Maximum liegt bei 78 Metern), obwohl der Mittelwert für diese konkrete Messung 6,53 Meter beträgt.

## 8.7 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die gemessenen Daten von dem ausgewählten Testszenario während einer Testfahrt auf einige bedeutende Merkmale analysiert. Es wurde gezeigt, dass während der dynamischen Messungen einige wichtige Merkmale GNSS basierter Positionsbestimmung schlechter geworden sind. Die Verfügbarkeit von Positionsinformationen bei der Berücksichtigung der minimalen Umgebungseigenschaften ist erkennbar schlechter als bei statischen Messungen [Rothacher 2007]. Die Positionsungenauigkeit wurde mittels des Referenzmesssystems GaTRail verglichen und anschließend analysiert. Genauso, wie bei der Verfügbarkeit der Positionsinformationen erreicht auch die Positionmessunsicherheit schlechtere Werte gegenüber statischen Messungen

# 9 Zusammenfassung und Ausblick

Satellitennavigation ist heutzutage für die Ortungssysteme im Straßen- und Schienenverkehr unumgänglich, trotzdem gibt es zurzeit nur wenige verbreitete Anwendungen. Die aktuellen Arbeiten von Forschungsinstitutionen, Komponentenherstellern, der Eisenbahnindustrie sowie nationalen und internationalen Behörden oder Einrichtungen die sich mit diesem Bereich beschäftigen, zeigen, dass hier ein großes Anwendungspotenzial besteht.

Zurzeit verfügbare satellitenbasierte Ortungssysteme haben den Nachteil, dass sie unter der Kontrolle des Militärs betrieben und daher aufgrund ihrer Unzuverlässigkeit nicht für Sicherheitssysteme verwendet werden können. Das kommende europäische System GALILEO wird das erste sein, das dieses Problem überwindet.

## 9.1 Zusammenfassung

Die Hauptparameter dieser Satellitennavigationssysteme wie z.B. die Verfügbarkeit werden stark von den Umgebungsbedingungen beeinflusst, da diese Bedingungen die Stärke und die Ausbreitung des empfangenen Signals beeinträchtigen. Hierbei ist eine ausführliche Analyse der kritischen Szenarien die diese Umgebungsbedingungen beschreiben unentbehrlich, um so die Auswirkungen auf die Energie des empfangenen Signals in solchen Umgebungen besser zu verstehen. Auf diese Weise können ggf. die systemspezifischen Merkmale bei der Entwicklung und dem Einsatz solcher Systeme berücksichtigt werden.

Für eine Einführung satellitenbasierter Ortung in Anwendungen oder Diensten, die mit der Sicherheit eines Systems betraut sind, ist hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit notwendig. Dies kann durch den von GALILEO bereitgestellten „Safety of Life“-Dienst erreicht werden. Hierfür wird eine Zertifizierung der Anwendungen und Dienste notwendig. Um einen solchen Zertifizierungsprozess durchzuführen, sind Tests unter Verwendung einer angemessenen Plattform unter realen Umgebungsbedingungen notwendig.

Um einen Zulassungsprozess von sicherheitsrelevanten Komponenten innerhalb eines Eisenbahnsystems erfolgreich durchlaufen zu können, ist es notwendig, dass die für die Entwicklung relevanten Standards eingehalten werden. Bei der Integration satellitenbasierter Ortung besteht allerdings das Problem, dass das jeweilige Ortungssystem nach eigenen Vorgaben und Standards entwickelt wurde. Es muss daher eine Verbindung zwischen den relevanten Dokumenten geschaffen werden.

Das System DemoOrt könnte eine genaue Positionsinformation über jeden Zug auf der Strecke liefern und dem Zugleiter so eine exakte Aussage zur Zugposition liefern. Somit kann das System als Grundlage für ein kostengünstiges Sicherungssystem verstanden werden.

Ein weiterer Vorteil einer kontinuierlichen Übertragung der ermittelten Positionsdaten ist eine bessere Einschätzung der Streckenauslastung und detailliertere Information über die genaue Lage des Zuges im Augenblick des Fahrtablaufs. Dadurch können kritische Zugzustände schneller erfasst und behoben werden, was wiederum kostenreduzierend ist [Schnieder et al. 2006].

Hierbei dienen die in den GALILEO-Dokumenten spezifizierten „minimum reception

---



conditions“ als Grundlage für die Validierung, da unter diesen Bedingungen der GNSS-Empfänger seine Funktion noch zuverlässig erfüllen muss. Dieses bildet die Grundlage für die Anforderungen an den Validierungsprozess, der zusätzlich die betriebstypischen Umgebungseinflüsse ebenfalls mit abdecken muss.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die wichtigen Eigenschaften Aspekte satellitenbasierter Ortungssysteme erläutert und einige relevante Merkmale detailliert beschrieben.

Zunächst wurden die verwendete Sensoren für Ortungsaufgaben in Eisenbahnbereich näher erläutert und ihre Eignung in dem Referenzmesssystem bewertet. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Sensoreigenschaften wurde das Dopplerradar zur Geschwindigkeitsmessung und RFID-System für absolute Ortung ausgewählt. Diese Kombination von verschiedenen unabhängigen Sensoren bietet die geforderte Redundanz, Genauigkeit und Diversität für ein Referenzmesssystem.

Es wurden die grundlegenden Einsatzmöglichkeiten von Referenzmesssystemen für satellitenbasierte Anwendungen im Eisenbahnbereich diskutiert und schließlich wurde auch einer der ersten Ansätze skizziert und erläutert.

Ist das Referenzmesssystem GaTRail aus Kapitel 7 implementiert und sind entsprechende Analyseverfahren entwickelt und in leistungsfähigen Werkzeugen umgesetzt, kann das Ziel einer konsistenten und vollständigen Spezifikation erreicht werden.

Während einer Testfahrt wurden Daten entsprechend einem Testszenario erhoben. Die Positionsungenauigkeit für statische und dynamische Messungen wurde mittels des Referenzmesssystems „GaTRail“ verglichen und anschließend analysiert. Es wurde gezeigt, dass man während der dynamischen Messungen (bei Berücksichtigung minimaler Umgebungseigenschaften) einige wichtige Eigenschaften GNSS basierter Positionsbestimmung quantitativ und qualitativ betrachtet kann.

Schließlich wird im nachfolgenden Ausblick das Messmanagementsystem beschrieben und einige allgemeine sowie spezifische Anforderungen aufgelistet. Die gesamte Arbeit befasst sich mit dem Themenbereich Validierung von GNSS basierten Ortungssystemen, der Teil eines Zertifizierungsprozesses ist. Dieser wird zusammen mit dem Akkreditierungsprozess formal dargestellt und erläutert

Diese Themenbereiche sind zurzeit in der Entwicklungsphase und bis zur Erstellung dieser Arbeit wurde noch keine GNSS basierte Anwendung im Eisenbahnbereich zertifiziert.

Eine weitere Erkenntnis dieser Arbeit ist die Anwendung von UML-Diagrammen zur formalen Beschreibung von Betriebszuständen und Prozessen. Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung von formalen Beschreibungsmitteln für die Darstellung sehr hilfreich ist, obwohl man zusätzlich erwähnen muss, dass die Eindeutigkeit, insbesondere bei UML-Diagrammen, in Frage gestellt werden muss. Sie wurden in der Informatik für die Unterstützung bei der in Programmierung entwickelt und eingesetzt, was wiederum in manchen Stellen bei der Anwendung in der Technik zur Uneindeutigkeiten führen kann.

## 9.2 Anforderungen an das Messmanagementsystem

Ein wirksames Messmanagementsystem stellt sicher, dass Messmittel und Messprozesse für den beabsichtigten Einsatz geeignet sind, und es ist von Bedeutung, um die Produktqualitätsziele zu erreichen und das Risiko falscher Messergebnisse beherrschbar zu machen. Zweck eines Messmanagementsystems ist, das Risiko zu beherrschen, dass Messmittel und Messprozesse falsche Ergebnisse liefern könnten, die die Qualität der von einer Organisation hergestellten Produkte beeinträchtigen könnten. Die für das Messmanagementsystem angewendeten Methoden reichen von einfacher Verifizierung der Messmittel bis zur Anwendung statistischer Verfahren bei der Lenkung des Messprozesses [DIN10012 2004]. In dieser Norm bezieht sich die Bezeichnung „Messprozess“ auf physikalische Messvorgänge (z.B. bei Entwicklung, Test, Produktion, Prüfung).

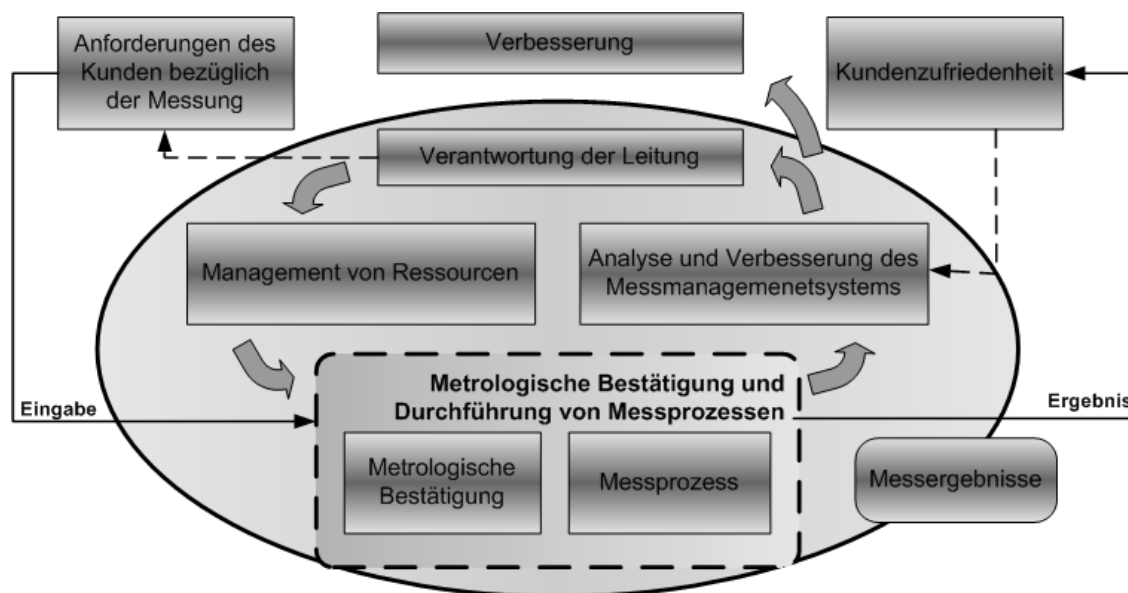


Abbildung 9-1 Modell des Messmanagementsystems nach [DIN10012 2004]

Einer der in ISO 9000 angeführten Grundsätze des Qualitätsmanagements behandelt den prozessorientierten Ansatz. Messprozesse sollten als besondere Prozesse betrachtet werden, die die Qualität der von der Organisation hergestellten Produkte unterstützen sollen. Das für diese Internationale Norm anzuwendende Modell des Messmanagementsystems ist in Abbildung 9-1 dargestellt [DIN10012 2004].

Diese Internationale Norm [DIN10012 2004] enthält sowohl Anforderungen als auch Anleitungen für die Verwirklichung von Messmanagementsystemen und kann von Nutzen bei der Verbesserung der Messabläufe und der Qualität der Produkte sein [DIN10012 2004].

### 9.2.1 Allgemeine Anforderungen

Das Messmanagementsystem muss sicherstellen, dass die festgelegten metrologischen Anforderungen erfüllt sind, welche aus Anforderungen an das Produkt abgeleitet werden. Diese Anforderungen werden sowohl für Messmittel als auch für Messprozesse benötigt. Anforderungen können als Höchstwert für Messabweichungen, zulässige Unsicherheit,

Messbereich, Stabilität, Auflösung, Umweltbedingungen abgeleitet werden [DIN10012 2004; DIN17025 2005].

Die Anforderungen an Ressourcen, an die Bestätigung und Realisierung von Messprozessen, Realisierungen, Messunsicherheit und Rückverfolgbarkeit und Auditierung werden näher in [DIN10012 2004] erläutert.

## 9.2.2 Anforderungen an das Prüflabor

Es ist zu betonen, dass die Anforderungen an das Prüflabor streng nach [DIN17025 2005] auszurichten sind. Diese Normen spezifizieren unter anderem Bereiche wie Validierungsverfahren, die Bestimmung der Verfahrensmerkmale, Dokumentation und Änderungserfassung usw. Für die praktische Anwendung eines solchen Validationsverfahrens im Prüflabor für GNSS basierte Anwendungen ist es erforderlich eine Menge von Standards [DIN10012 2004; DIN19259 1996; DIN ISO 5725-1 1997; DIN17025 2005] und Normen in Betracht zu ziehen [Guscioni et al. 2004].

Im Rahmen der Akkreditierungsverfahren muss man sich künftig mit der Frage der Validierung der Prüfmethode beschäftigen. Von mehreren internationalen Behörden und Arbeitsgruppen wie zum Beispiel

- CITAC (Co-Operation on International Traceability in Analytical Chemistry),
- EA (European Co-operation for Accreditation),
- Eurachem (Focus for Analytical Chemistry in Europe)
- EUROLAB (European Federation of National Associations of Measurements, Testing and Analytical Laboratories)
- IEC (International Electro technical Commission)
- ILAC (International Laboratory Accreditation Co-operation)
- ISO (International Organization for Standardization)
- SAS (Schweizerische Akkreditierungsstelle)
- VIM (International Vocabulary of basic and general terms in Metrology)

wurden verschiedene Leitfäden („Guides“) und Dokumente zu dieser Problematik erarbeitet [Guscioni et al. 2004; Sommer, Siebert 2004].

Eine formale Darstellung des Zertifizierungsprozesses für einen GNSS Empfänger ist der Abbildung 9-2 zu entnehmen [Hänsel et al. 2008]. Hierfür wurden die Standards [DIN10012 2004; DIN13005 1999; DIN17000 2005; DIN17011 2005; DIN17020 2004; DIN17025 2005; DIN17050-1 2005; DIN17050-2 2005; EN9000 2000] bei der Formalisierung dieses Prozesses angewendet. Die fachspezifischen Fragen, welche aus der Anwendung dieses Standards resultieren können, werden in dieser Arbeit nicht weiter detailliert betrachtet. Es ist aber festzustellen, dass ohne grundsätzliche Betrachtung aller dieser Standards, die sich mit der ganzen Bandbreite an Themen im Zusammenhang mit der Zertifizierung beschäftigen, der Zertifizierungsprozess für GNSS basierte Anwendungen nicht beherrscht wird [Hänsel et al. 2008; GJU 2005].

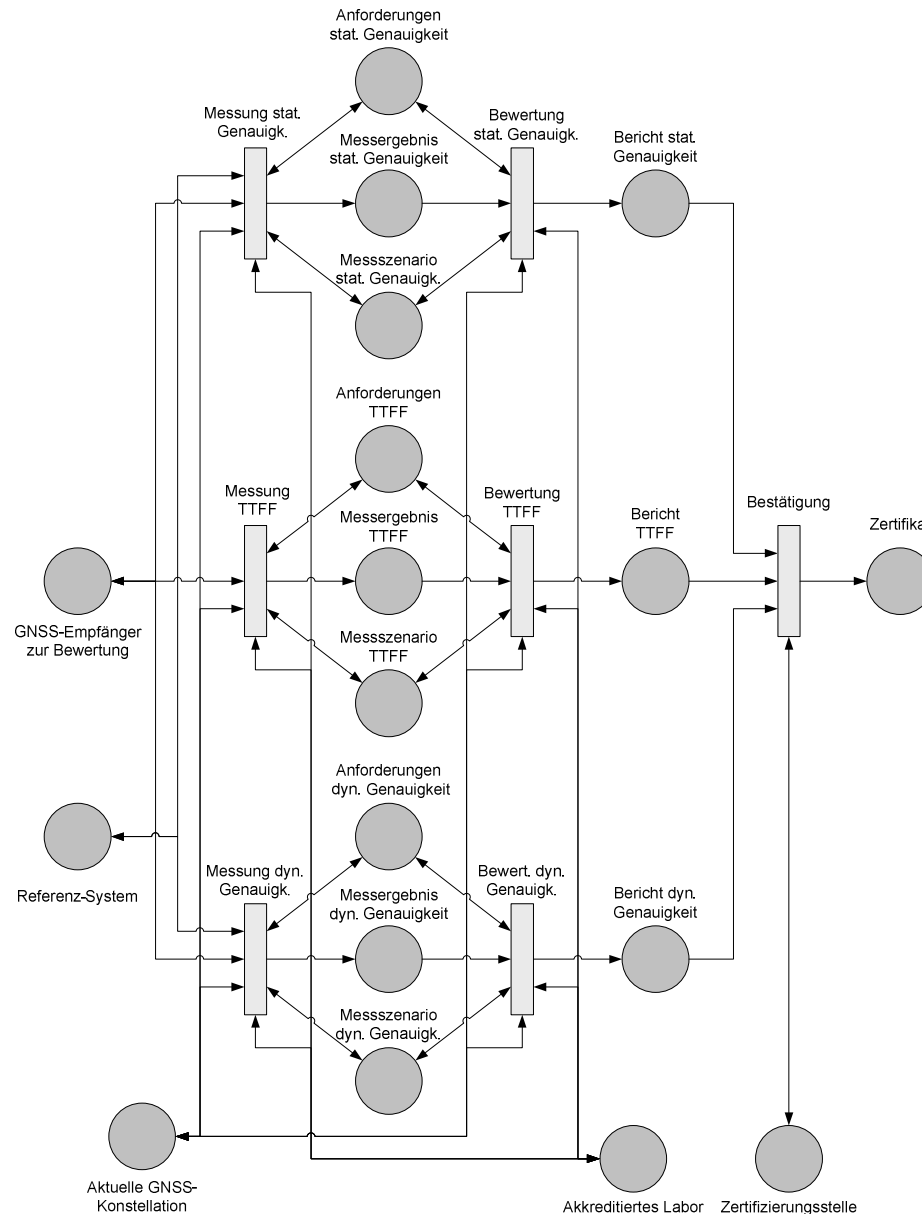


Abbildung 9-2 Formale Darstellung des Zertifizierungsprozesses [Hänsel 2008]

### 9.2.3 Akkreditierungsprozess

Ein weiterer großer Forschungsbereich, welcher hier nur formal dargestellt wird, ist der Akkreditierungsprozess. In Abbildung 9-3 sind die Beziehungen zwischen im Akkreditierungsprozess beteiligten Stellen dargestellt. Genauso wie beim Zertifizierungsprozess der GNSS-Anwendungen resultiert auch hier eine Vielzahl an offenen Fragen, die ein Bestandteil der aktuellen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet sind [DIN17000 2005; ISO IEC 17030 2003; Hänsel et al. 2008].



# 10 Glossar

1. Newtonsche Axiom.....	43	Eurobalise .....	51
Abstraktion.....	28	External Region Integrity System .....	67
Aircraft Autonomous Integrity Monitoring.....	69	Factorystart .....	73
Aktivitätsdiagramme .....	27	FFFIS .....	100
Almanach-Daten .....	58, 73	GADEROS.....	17, 89
Anwendungsfalldiagramme .....	27	GAGAN .....	71
APOLO .....	17, 89	GALILEI.....	89
Auswertung von Messwerten .....	33	GALILEO .....	20, 53, 60, 62, 63, 65, 67, 71, 83, 95
Binary Offset Carrier .....	64	GALILEO Control Centre .....	66
Binary Phase Shift Keying .....	64	GALILEO Sensor Station .....	66
Brainstorming.....	102	GALILEO System Time .....	68
Brainwriting .....	102	GALILEO Terrestrial Reference Frame .....	68
Circular Error Probable .....	58	GARE .....	21
Concept Map .....	102	GATE.....	20
CWAAS .....	71	GaTRail.....	21, 108, 120, 125, 127
DemoOrt .....	17, 89, 90, 93, 110	GDOP .....	78, 79
Dielektrika.....	74	GEMINI.....	17, 89
Digitale Karte .....	92, 112, 113, 116	GEORAIL.....	89
DOP .....	78, 79	GIRASOLE.....	17, 89
Dopplereffekt .....	36	Gleisstromkreis .....	47
ECORAIL .....	17, 89	GLONASS .....	53, 58, 71, 87
EGNOS .....	71	GNSS .....	21, 53, 69, 79, 81, 87, 94, 121
ERGOSPACE .....	20	GNSS-Empfänger .....	82, 84, 121, 125
ERTMS .....	89, 92	GPS.....	53, 55, 57, 71, 87
eSISE.....	83	GPS Kontrollsegment .....	56
ETCS.....	89, 92, 117	GRAIL .....	89
		GRANADA .....	20

---

GSSF.....	20	NAVSTAR.....	55
Hallsensoren.....	46	Objekt .....	27
HDOP.....	78, 80, 124	Odometer .....	44
Hotstart.....	73	Optische Kreisel.....	44
Induktive Zugsicherung .....	48	Passiven Transponder .....	50
Instanz .....	28	PDOP .....	78
Interferenz .....	75	Permeabilitätszahl.....	74
Kaltstart.....	73	Permittivitätszahl .....	74
Klassen.....	27	Polaris .....	19
Klassifikation von Sensoren.....	29	Polarisationsänderung .....	75
Korelationsverfahren.....	38	PREDISSAT .....	21
Kreativitätstechnik .....	101	ProDDAGE.....	89
Krokodil .....	48	Pseudoabstand.....	53
Ladar .....	41	Pseudo-Random-Noise-Code.....	53
Leitfähigkeit.....	74	QZSS.....	71
Lichtschranke .....	47	Radar.....	41
Lidar .....	41	Radimpulsgeber .....	45
Linienförmigen Zugbeeinflussung .....	49	RailDrive .....	20
LOCASYS .....	17, 89	RAIM.....	54, 69
LOCO.....	17, 89	Ranging Signal.....	58
LOCOPROL .....	17, 89	Receiver Autonomous Integrity Monitoring .....	69
Long Range Radar .....	41	Referenzmesssystem .....	94, 105, 118, 125
Maxwell'schen Gleichungen.....	74	Reflexion.....	75
Medium Earth Orbit .....	65	RFID .....	49, 105, 108, 110, 111, 117
Messstrecke.....	103	Root-mean-squared Störung .....	57
Messunsicherheit.....	94, 96, 108, 126	RUNE .....	17, 89
Mikrowellensensor.....	109, 116, 117	Sagnac-Effekt.....	44
Mind Map.....	102	SATNAB .....	17, 89
Morphologie.....	101	Semi-Aktive Transponder .....	50
MSAS.....	71	Sensor .....	29

## Validierung von satelliten basierten Eisenbahnortungssystemen

---

Sequenzdiagramme .....	27	Uplink Stations .....	67
SISA .....	83	URS.....	100
SISE .....	83	Validierung .....	98
SISMA .....	83	VDOP .....	78
SNAS .....	71	Vererbung .....	28
Spherical Error Probable .....	58	Virtuelle Balise .....	113
Synektik .....	102	WAAS.....	71
TDOP .....	79	Warmstart.....	73
Telemetry Tracking & Command Station .....	66	Wide Area Augmentation System.....	72
Transponder .....	49, 50	Wirbelstromsensor .....	45, 91
TTFF .....	73	W-LAN .....	118
UERE-Fehler.....	78	XML .....	108, 117
UML.....	27	ZEUS .....	17, 89
Unified Modeling Language .....	27	Zugbeeinflussung .....	48



# 11 Literaturverzeichnis

- Airservices Australia (2007): Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Online verfügbar unter [http://www.airservicesaustralia.com/pilotcentre/projects/gnss/gnss\\_gbas\\_paper.pdf](http://www.airservicesaustralia.com/pilotcentre/projects/gnss/gnss_gbas_paper.pdf).
- Alcouffe, Fabien; Barbu, George (2001): APOLO. Advanced positon locator system. Final Report.
- Antova, Mariya Antonova (2006): Analysis of Satellite-based Positioning Systems for Safety-related Applications in Land Transport. Master Thesis. Herausgegeben von Institute of Operating Systems and Computer Networks, TU Braunschweig und TU-Braunschweig IVA. Braunschweig.
- Artisan (2007): Management Briefing. Anforderungsmanagement und Systems Engineering. Herausgegeben von Artisan Software. Braunschweig; Stuttgart.
- Bachmair, H. (2004): Messunsicherheitsbestimmung und Rückführung als Voraussetzung für die weltweite Anerkennung von Messungen. VDI-Berichte Nr. 1867. Herausgegeben von VDI. Braunschweig.
- Barbu, George (2000): Requirements of Rail Applications. In: GNSS Rail User Forum, Jg. 5.
- Barbu, George (2008a): GEORAIL. Railway geodesy Guidelines for use of absolute coordinates in railway geo-reference applications. Herausgegeben von UIC. UIC. Paris.
- Barbu, George (Hg.) (2008b): GNSS / Galileo certification for rail safety applications. Railway requirements and the strategic position of UIC.
- Baumann, Stefan; Sichert, Tomas (2007): Nutzung der Satellitennavigation für sicherheitsrelevante Anwendungen - Möglichkeiten und Grenzen. In: Positionen 2007.
- Baumer Ident (2003): Zentraleinheit CU 30. Systembeschreibung und Instalation. Herausgegeben von Baumer Ident.
- Bazant, L.; Taufer, J. (Hg.) (2008): The pseudolite system concept for railway: WCRR Seoul.
- Becker, D.; Thiel, K. (1995): Calibration of Multipath by Means of a GPS Attitude Platform. In: Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation (SPN), S. 14-18.
- Becker, U.; Hänsel, F.; Poliak, J.; Schröder, J.; Schnieder, E.; Zhou, Y. (2008): ZEUS. Entwicklung einer Methodik zur Zertifizierung von Ortungseinrichtungen unter sicherheitsrelevanten Aspekten. Endbericht, Förderzeichen: 50 NA0615. Herausgegeben von TU-Braunschweig IVA.
- Behme, Henning; Mintert, Stefan (2000): XML in der Praxis - Extensible Markup Language für Profis. 2. erweiterte Auflage. Hannover/Dortmund: Addison Wesley Longman Verlag.
- Beisel, D.; Poliak, J.; Hänsel, F.; May, J.; Becker, U.; Schnieder, E. (2007): Satellitenbasierte fahrzeugautarke Ortung im Schienenverkehr. In: GZVB (Hg.): POSITIONs 2007 : Satellitennavigationsforum für Nutzer und sicherheitskritische Anwendungen Satelliten gestützter Ortung, 15.-17. Oktober 2007. Braunschweig , S. 61-67.
- Beugin, Julie; Marais, Juliette (Hg.) (2008): An approach to Quantify the Satellite-Based Train Location Service Using a Petri-Net Model: WCRR Seoul.
- Bikker, G.; Schroeder, Hans Martin (2002): Methodische Anforderungsanalyse und automatisierter Entwurf sicherheitsrelevanter Eisenbahnleitsysteme mit kooperierenden Werkzeugen. Technische Universität Braunschweig.
- Bikker, G.; Schroeder, M.; Schnieder, E. (1999): Satellite Based Locating in Guided Traffic - Chances for Fleet Management, Freight Customer Information, Track Maintenance or Operational Train Control. Forschung und Industrie. Toulouse.
- Blume, H. -J; Wesner, G. (2002): Geschichte und Zukunft der Fahrerinformation. In: 100 Jahre Tacho.
- Bohm, Gerhard; Zech, Günter (2006): Einführung in die Statistik und Messwertanalyse für Physiker: Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron.
- Böhringer, Frank (2008): Gleisselektive Ortung von Schnienenfahrzeugen mit bordautonomer Sensorik. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
-

- Born, Marc; Holz, Eckhardt; Kath, Olaf (2003): Softwareentwicklung mit UML 2 - Die neuen Entwurfstechniken UML 2, MOF 2 und MDA. Bonn/München: Addison-Wesley.
- Bosch (2001): Fachwissen Kfz-Technik - Sensoren im Kraftfahrzeug: Robert Bosch GmbH.
- Box, George E. P.; Hunter, J. Stuart; Hunter, William G. (2005): Statistic for Experimenters: Wiley (Second Edition).
- Bray, Tim (1998): RDF and Metadata. Online verfügbar unter <http://www.xml.com/lpt/a/98/06/rdf.html>.
- Brumm (2005): Auskünfte (via E-Mail und telefonisch) eines Mitarbeiters, Mario Brumm (Manager Sales Department) der Firma IBEO AS GmbH.
- Czommer, Renate (2000): Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken. Universität Stuttgart. Online verfügbar unter [http://elib.unistuttgart.de/opus/volltexte/2001/818/pdf/Czommer\\_Diss.pdf](http://elib.unistuttgart.de/opus/volltexte/2001/818/pdf/Czommer_Diss.pdf).
- Dakoupki, Solange Ngantcha (2008): Spezifikation einer Methode für die Validierung des Galileo Systems für sicherheitsrelevante satellitenbasierte Ortung im bodengebundenen Verkehr. Herausgegeben von Technische Universität Braunschweig. Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik.
- Dana, Peter H (2007): Global Positioning System Overview.
- DAR (2002): Vorstellung eines Konzepts zur Messunsicherheit im Prüfwesen in Verbindung mit der Anwendung ISO/IEC 17025. DAR-4-INF-09. Herausgegeben von Deutsche Akkreditierungsrat.
- Deuta (2005): DRS05. Deuta (Hg.): Deuta.
- DIN EN 50129 (2003): Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme. Sicherheitsrelevante elektronische Systeme für Signaltechnik. Berlin: VDE Verlag.
- DIN ISO 5725-1 (1997): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen. In: Deutsche Norm, Jg. 1, S. 44.
- DIN ISO 5725-5 (2002): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen. Teil 5: Alternative Methoden für die Ermittlung der Präzision eines vereinheitlichten Messverfahrens. Herausgegeben von DIN. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN ISO 5725-2 (2002): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen. Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichspräzision. Herausgegeben von DIN. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN ISO 5725-3 (2003): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen. Teil 3: Präzisionsmaße eines vereinheitlichten Messverfahrens unter Zwischenbedingungen. Herausgegeben von DIN. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN ISO 5725-4 (2003): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen. Teil 4: Grundlegende Methoden für die Ermittlung der Richtigkeit eines vereinheitlichten Messverfahrens. Herausgegeben von DIN. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN ISO 5725-6 (2002): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen. Teil 6: Anwendung von Genauigkeitswerten in der Praxis. Herausgegeben von DIN. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN10012 (2004): Messmanagementsysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel (ISO 10012:2003). In: Deutsche Norm, Jg. 1, S. 56.
- DIN13005 (1999): DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN1319-3 (1996): Grundlagen der Meßtechnik. Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße. Meßunsicherheit ICS 17.020. Herausgegeben von Deutsche Norm.
- DIN17000 (2005): DIN EN ISO/IEC 17000: Konformitätsbewertung - Begriffe und allgemeine Grundlagen. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN17011 (2005): DIN EN ISO/IEC 17011: Konformitätsbewertung - Allgemeine Anforderungen an Akkreditierungsstellen, die Konformitätsbewertungsstellen akkreditieren. Berlin.
- DIN17020 (2004): DIN EN ISO/IEC 17020: Allgemeine Kriterien für den Betrieb verschiedener Typen von Stellen, die Inspektionen durchführen. Berlin: DAPDAP GmbH.

- DIN17025 (2005): Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. In: Deutsche Norm, Jg. 1, S. 73.
- DIN17050-1 (2005): DIN EN ISO/IEC 17050-1: Konformitätsbewertung - Konformitätserklärung von Anbieter-Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin.
- DIN17050-2 (2005): DIN EN ISO/IEC 17050-2: Konformitätsbewertung - Konformitätserklärung von Anbieter-Teil 2: Unterstützende Dokumentation. Berlin.
- DIN19259 (1996): Datentypen mit Klassifikationsschema für Messeinrichtungen mit analogen oder digitalem Ausgang für die Prozessmesstechnik.
- DIN70000 (1994): Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten; Begriffe (ISO 8855:1991 modifiziert).
- Djike, Betrand Nana (2007): Testszenarienanalyse für sicherheitsrelevante satellitenbasierte Ortung im bodengebundenen Verkehr. Technische Universität Braunschweig.
- Dobos; Duha; Marchevsky; Wieser (2002): Mobilne Radiove Siete. Zilina: EDIS-Verlag.
- Drodowski, G. (1977): Duden: Das große Wörterbuch der deutschen Sprache: Bibliographisches Institut, Mannheim.
- EC (Hg.) (1999): Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services.
- EC (2003): The galilei project-galileo design consolidation. In: Technical Documents of the GALILEO-European Satellite Navigation System.
- EC (2004): Directive 2004/49/EC on safety on the Community's railways (Safety Directive). Herausgegeben von European Parliament. The Council of the European Union.
- Eckstein, Reiner; Eckstein, Silke (2004): XML und Datenmodellierung. Heidelberg: dpunkt.verlag GmbH.
- Eissfeller, B. (1997): Ein dynamisches Fehlermodell für GPS Autokorrelationsempfänger. Universität der Bundeswehr München.
- EN 50155 (2002): Bahnanwendungen - Elektronische Einrichtungen auf Schienenfahrzeugen. Deutsche Fassung. Herausgegeben von CENELEC.
- EN50126 (2000): Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS).
- EN9000 (2000): Qualitätsmanagementsysteme Grundlagen und Begriffe.
- Engelberg, Thomas (2001): Geschwindigkeitsmessung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren. Universität Karlsruhe.
- ESA (2001): Galileo System Requirements Document: esa.
- ESA (2002a): Galileo Mission High Level Definition.
- ESA (2002b): Mission High Level Definition: esa.
- ESA (2003): Discussion Paper on the Galileo Integrity Concept. ESA-APPNG-TN/00391-JH. Herausgegeben von ESA.
- ESA (2005a): Galileo Integrity concept.
- ESA (2005b): L1 band part of Galileo Signal in Space ICD (SIS ICD). Online verfügbar unter <http://www2.matimop.org.il/1/foreign/Galileo%20Signal.pdf>.
- ESA (2006a): EGNOS, The European Geostationary Navigation Overlay System-A corner of Galileo.
- ESA (2006b): Galileo Open Service- Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD) Draft 0.
- ESA (2007): GIOVE-A navigation signal available to users. Online verfügbar unter [http://www.esa.int/esaNA/SEM4EDN0LYE\\_galileo\\_0.html](http://www.esa.int/esaNA/SEM4EDN0LYE_galileo_0.html).
- EUROCAE (2006): Interim Minimum Operational Performance Specification for Airborne Galileo Satellite Receiving Equipment. Herausgegeben von EUROCAE.
- Europa-Rapid-Press Releases (2005): Antikollisions-Radar: Die Kommission ermöglicht die Ausrüstung von Kraftfahrzeugen mit iener Technologie für die Straßenverkehrssicherheit. Online verfügbar unter

<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/05/54&format=HTML&aged=0&language=de&guiLanguage=en>.

Evers, Harry; Kasties, Günter (2005): Kompendium der Verkehrstelematik: TÜV-Verlag.

Filip, A.; Suchánek, J. (2006): Certifikace satelitního signálu GALILEO pro železniční aplikace.

Filip, Ales; Beugin, Julie; Marais, Juliette; Mocek, Hynek (2008): A relation among GNSS quality measures and railway RAMS attributes: Proceedings of the CERGAL 2008. Braunschweig .

Finkenzeller, Klaus (2005): RFID-Handbuch: Hanser Verlag München.

Fowler, Martin; Scott, Kendall (2000): UML konzentriert: Addison-Wesley.

Franke, H. J. (2002): Maschinenelemente 1. H. J. Franke (Hg.): TU Braunschweig.

Frasca, Mattia; Arena, Paolo; Fortuna, Luigi (Hg.) (2004): Bio-inspired emergent control of locomotion systems. World Series on Nonlinear Science: Series A /// Bio-inspired emergent control of locomotion systems. New Jersey: World Scientific.

FSA (2004): Proton-K GLONASS, GLONASS-M. Herausgegeben von Federal Space Agency. Online verfügbar unter [http://www.roskosmos.ru/video/Glonass\\_Bloock\\_www1.pdf](http://www.roskosmos.ru/video/Glonass_Bloock_www1.pdf).

Fuhlbrügge, Hans-Joachim (2004): Untersuchungen zur Prüfung von GPS-Echtzeitsystemen als Beitrag zur Qualitätssicherung im Vermessungswesen. Nr. 91. Herausgegeben von Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn. Bonn.

Galileo (2002): Galileo Mission Requirements Document. Issue 5 - Draft. Herausgegeben von European Commission und ESA.

Galileo Industries (2005): Galileo Integrity User Equations. Working paper. GAL-TNO-GLI-SYST-I/0630. Herausgegeben von Galileo Industries.

Garvin, Angel; Scarda, Stefano; Sheridan, Kevin; Herrero, Ignacio (2006): Polaris. A Software Tool to Support GNSS-based Application Design. In: GNSS 2004.

Geistler, A. (2006): Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren. Universität Karlsruhe.

Gerlach, Katrin; Grimm, Matthias; Eickamann, Carla; Meyer zu Hörste, Michael (2007): RailDriVE. Ortung in der Spur. Herausgegeben von DLR. Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung: Rail Automation 2007.

Girasole (2005): Galileo Safety of Life Receivers Development. Receiver Specification for Railway Applications. GIRA-WP2-AAS-DEL-21. Herausgegeben von Girasole, S. 1–97.

GJU (2005): Position Paper No. 5A. Certification. Herausgegeben von Galileo Joint Undertaking.

Gottwald, Siegfried; Kästner, Herbert; Rudolph, Helmut (1995): Meyers Kleine Enzyklopädie Mathematik: Meyers Lexikonverlag (14).

Grewal, M. S.; Weill, L. R.; Andrews, A. P. (2001): Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration: John Wiley & Sons.

Grimsehl, E. (1985): Mechanik-Akustik-Wärmelehre. Teubner Verlagsgesellschaft (Hg.) (Band 1).

Gu, Xiaogang (2005): Die Machbarkeit von GNSS / Galileo-basierter Zugortung für sicherheitsrelevante Anwendungen, Jg. 1+2, H. 97, S. 6-11.

Guscioni, Nicolas; Pilloud, Claude; Seeberger, Max; Studer, Werner (2004): Leitfaden zur Validierung von Prüfmethoden und Bestimmung der Messunsicherheit für Laboratorien im Bauwesen.

Hänsel, F. (2008): Zur Formalisierung technischer Normen. Technische Universität Braunschweig.

Hänsel, F.; Poliak, J.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006a): Concepts of Certification for Usage of Satellite Based Positioning Systems in Transportation under Safety Aspects: Proceedings on the International Symposium on Operational Space Applications. Toulouse .

Hänsel, F.; Poliak, J.; Hübner, M.; Beisel, D.; Becker, U.; Schnieder, E. (2007): Reference Platforms for the Certification of Satellite Based Localisation Systems in Transportation: Proceedings of the 15th international symposium "Towards more competitive European rail systems" - EURNEX-ZEL .

- Hänsel, F.; Poliak, J.; Lux, M.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006b): Carla - an Experimental Platform for Land Based Traffic: Proceedings of the ITS World Congress 2006. London .
- Hänsel, F.; Poliak, J.; Schnieder, E.; Barbu, G. (2006c): Framework for Certification of GALILEO for Railway Applications. In: WCRR (Hg.): Abstracts of the 7th World Congress on Railway Research - WCRR. Montréal/Canada , S. 251.
- Hänsel, F.; Poliak, J.; Slovak, R.; Schnieder, E. (2005): A Demonstrator for Validation and Visualisation of Processes in Guided Transportation. In: Universität Zilina (Hg.): Tagungsband des 12. Internationalen Symposium Zel 2005. Zilina (Slowakei) , S. 58-66 (Volume I).
- Hänsel, F.; Zhou, Y.; Poliak, J.; Schnieder, E. (2008): Approach for the description of terminologies and processes in standards. In: DGON (Hg.): Proceedings of the CERGAL 2008, 02.-03. April 2008 in Braunschweig .
- Hecht, H. P.; Schaser, F. (2006): Infrastrukturausbau in Europa: Ausbau- und Neubaustrecke Karlsruhe-Basel: Streckenabschnitt 9/Katzenbergtunnel. In: ETR. Eisenbahntechnische Rundschau, Jg. 55, H. 1-2, S. 39-46.
- Hein, Guenter; Pany, Thomas (2002): Architecture and Signal Design of the European Satellite Navigation System Galileo. In: Journal of Global Positioning Systems.
- Heinrichs, G.; Lohnert, E.; Wittmann, E.; Mundle, H. (2005): Status of the German Galileo Test Environment for Receivers and User Applications-GATE. In: The European Navigation Conference-GNSS.
- Horn, J. (2006): Zweidimensionale Geschwindigkeitsmessung texturierter Oberflächen mit flächenhaften bildgebenden Sensoren. Universität Karlsruhe.
- Hu, X.; Lohan, E. S. (2007): GRANADA validation of optimized Multiple Gate Delay structures for Galileo SinBOC (1, 1) signal tracking. In: Telecommunications, 2007. ITST'07. 7th International Conference on ITS, S. 1-5.
- Hümmer, Klaus (1998): Funktion und Einsatzweise isolierstoßlos, kodierter Gleistromkreise für Hochgeschwindigkeitsstrecken.
- Hurskainen, H.; Lohan, E. S.; Hu, X.; Raasakka, J.; Nurmi, J.: Multiple Gate Delay tracking structures for GNSS signals and their evaluation with Simulink, SystemC and VHDL.
- ICAO (Hg.) (2007): Global Navigation Satellite Systems (GNSS).
- ISO IEC 17030 (2003): Conformity assessment - General requirements for third-party marks of conformity. International Standard. ISO/IEC 17030:2003(E). Herausgegeben von ISO.
- ISO VIM (2004): International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM).
- ISO GUM (1995): Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1995.
- Jacobsen, René (2003): Fusion von GPS und Videosequenzen für die Fußgängernavigation. Universität Hannover.
- Jeckle, M.; Rupp, C.; Hahn, J.; Zengler, B.; Queins, S. (2004): UML 2 glasklar, volume 1: Carl Hanser Verlag München Wien.
- Juckenack (1989): Handbuch der Sensortechnik - Messen mechanischer Größen: Verlag moderne Industrie.
- Kaplan, E. D. (1996): Understanding GPS, principles and applications: Artech House.
- Kaplan, Elliot; Hegarty, Christopher (2006): Understanding GPS - Principles and Applications. Kaplan, Elliot; Hegarty, Christopher (Hg.): Artech House.
- Karamanolis, S. (1996): Elektromagnetische Wellen. Elektra Verlags-GmbH (Hg.).
- Käs, G.; Pauli, P. (1991): Mikrowellentechnik. Franzis-Verlag (Hg.).
- Kiriczi, Sven Bernhard (1996): Signaltechnisch sichere Fehlergrenzen für die Erfassung der Bewegungszustände von Bahnen: Fortschritt-Berichte VDI Verlag (8).
- Klinge, K. A.; Röver, S. (1997): RailOrt. Ortung im spurgebundenen Verkehr auf der Basis von Satelliten-Navigation. In: BMBF-Schlußbericht. Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik und Institut für Flugführung (TU Braunschweig).
- Klinge, Karl-Albrecht (1998): Konzept eines fahrzeugautarken Ortungsmoduls für den spurgebundenen Verkehr. Technische Universität Braunschweig.

- Kowoma (2007): GPS-Info. Online verfügbar unter <http://www.kowoma.de/gps/Satelliten.htm>.
- Langley, R. (1997): GLONASS: Review and update GPS World: GPS World 1997.
- Lapris, J. C. (1991): Basic Concepts and Terminology, IFIP WG 10.4 Dependable Computing and Fault-Tolerant Systems: Springer Verlag, wien; New York (5).
- Leick, A. (1995): GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, Inc (Hg.).
- Leinhos, Dirk (1996): Analyse und Entwurf von Ortungssystemen für den Schienenverkehr mit Strukturierten Methoden. Technische Universität Braunschweig.
- Lichner, Dusan (2004): Die Hohe Tatra und ihre Bahnen. Zilina: EDIS-Verlag.
- Lorrain, P.; Corson, D. R.; Lorrain, F. (1995): Elektromagnetische Felder und Wellen. Walther de Gruyter-Berlin (Hg.).
- Lux, Michael (2006): Installation und Bewertung eines Laser-Scanners in einem Versuchsfahrzeug. Herausgegeben von Technische Universität Braunschweig.
- Maljuk, Oleg (2006): Entwicklung eines Referenzmesssystems für eine Ortungsplattform. Herausgegeben von TU-Braunschweig IVA.
- Mansfeld, W. (2006): Satellitenortung und Navigation, Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. Friedr. Vieweg & Sohn erlagsgesellschaft mbH (Hg.).
- Mansfeld, Werner (1998): Satellitenortung und Navigation: Vieweg-Verlag.
- Marais, J. (2002): Localisation de mobiles terrestres par satellites. Mise en œuvre d'outils permettant l'analyse de l'influence des conditions de propagation et des effets de masques sur la disponibilité du service offert. In: Thèse préparée au sein de l'INRETS-LEOST - en vue de l'obtention du titre de Docteur de USTL spécialité Electronique, 4 juillet 2002.
- Marais, J.; Berbineau, M.; Frimat, O.; Franckart, J. P. (2003): Un nouveau système satellitaire de contrôle-commande pour lignes à faible densité de trafic - A new satellite-based fail-safe train control and command for low density railway lines. In: TILT.
- Marais, J.; Poliak, J.; Hänsel, F. (2007a): First steps towards GALILEO validation for railways. In: DGON (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Certification of GNSS Systems & Services, CERGAL 2007 : Braunschweig, Germany, 24 - 25 April 2007. Braunschweig .
- Marais, J.; Poliak, J.; Hänsel, F. (2007b): Tools for validation and acceptance of GNSS solutions in rail: Proceedings of the ENC-GNSS 2007. Genf .
- Martin, Harold (Hg.) (2008): GPS Status and Modernisation. Munich: GNSS Summit 2008.
- Meyer zu Hörste, Michael (2004): Methodische Analyse und generische Modellierung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. Technische Universität Braunschweig, Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik.
- Misra, P.; Enge, P. (2001): Global Positioning System: Signals, Measurement and Performance. Lincoln, MA:Ganga -Jamuna (Hg.).
- Murr (1991): Systembeschreibung der Linienzugbeeinflussung (LZB) der Deutsche Bahn, Eisenbahn-Ingenieurkalender.
- Nathanson, F. E.; Reilly, J. P.; Cohen, M. N. (1991): Radar design principles-Signal processing and the environment. In: New York, McGraw-Hill, Inc., 1991, 733 p.
- Naturtoday (2005): Lidar – Info auf Physik.NaturToday.de: Lidar. Online verfügbar unter <http://physik.naturtoday.de/Lidar>.
- Ortner, E. (1997): Methodenneutraler Fachentwurf: Teubner.
- OSTAN, L. (2001): Analyse des performances des systèmes de Navigation par satellites en zone urbaine. l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile.
- Pachl, Jörn (1999): Systemtechnik des Schienenverkehrs: B. G. Teubner.
- Pacovsky, Peter (2006): Clovek a cas, time management 4 generace: GRADA.

- Pfister, Jörg; Plank-Wiedenbeck, Uwe; Zimmermann, Frank; Steindl, Eduard (2006): Galileo-Systemsimulation zur Bewertung kombinierter Methoden der Positionsbestimmung. Online verfügbar unter [http://www.pwp-systems.de/pdf/DGON\\_Galileo-Simulation\\_2006-11-22.pdf](http://www.pwp-systems.de/pdf/DGON_Galileo-Simulation_2006-11-22.pdf).
- Physikevolution (2008): Jenseits der Lichtgeschwindigkeit-Gedankenspiele und Experimente zu Relativitätstheorie. Online verfügbar unter <http://www.physikevolution.de/JdLpdf.pdf>.
- Plan, Oliver (2003): GIS-gestützte Verfolgung von Lokomotiven im Werkbahnverkehr. Dissertation. Herausgegeben von Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München.
- Poliak, J.; Hänsel, F. (2007): Messsysteme und Sensorik. In: Schnieder, E. (Hg.): Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs. Berlin/Heidelberg: Springer [VDI-Buch], S. 73-118.
- Poliak, J.; Hänsel, F.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006a): Methods for Certification for Safety Related Usage of Satellite Based Positioning Systems in Transportation. In: Mikulski, Jerzy (Hg.): Advances in Transport Systems Telematic. Katowice/Polen , S. 79-85.
- Poliak, J.; Hänsel, F.; Hübner, M.; Becker, U.; Schnieder, E. (2007a): Approaches for Reference Localisation Platforms in Ground Transportation for Satellite Based Localisation: Proceedings of the 6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services - ITS. Aalborg/Denmark .
- Poliak, J.; Hänsel, F.; Hübner, M.; Beisel, D.; Weng, Y.; Becker, U.; Schnieder, E. (2008a): Referenzmesssysteme für satellitenbasierte Positionssysteme in Bodenverkehr - Ein Konzept zur dynamischen Vermessung & Qualifizierung von GNSS-Empfängern. In: VDI (Hg.): Proceedings der VDI-Tagung "Sensoren und Messsysteme", 11.03.2008-12.03.2008 Ludwigsburg .
- Poliak, J.; Hänsel, F.; Lux, M.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006b): Measurement Platforms for Satellite Based Positioning Systems. In: Mikulski, Jerzy (Hg.): Advances in Transport Systems Telematic. Katowice/Polen , S. 69-77.
- Poliak, J.; Hänsel, F.; Lux, M.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006c): Platforms for Qualification of Positioning Systems for Ground Transportation. In: van Zuylen, Hank; Middelham, Franz (Hg.): Proceedings of the 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems - CTS 2006. Delft/Niederlande , S. 509-512.
- Poliak, J.; Hänsel, F.; Lux, M.; May, J.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006d): Reference Measurements Platforms for Satellite Based Positioning Systems in Safety Related Transport Applications for Ground Transportation: Proceedings of the International Symposium on Certification of GNSS Systems & Services - CERGAL 2006 .
- Poliak, J.; Hänsel, F.; May, J.; Becker, D.; Schnieder, E. (2006e): Vehicle Autonomous Localisation on Secondary Railway Lines for Safe Applications. In: Mikulski, Jerzy (Hg.): Advances in Transport Systems Telematic. Katowice/Polen , S. 207-215.
- Poliak, J.; Hänsel, F.; May, J.; Becker, D.; Schnieder, E. (2006f): Vehicle Autonomous Positioning as a Basis for a Low cost Train Protection System: Proceedings of the ITS World Congress 2006. London .
- Poliak, J.; Hänsel, F.; May, J.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006g): Safe Vehicle Autonomous Localisation for Railway Application: Proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications. Chengdu/China .
- Poliak, J.; Hänsel, F.; May, J.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006h): Vehicle Autonomous Localisation for Safe Railway Applications. In: van Zuylen, Hank; Middelham, Franz (Hg.): Proceedings of the 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems - CTS 2006. Delft/Niederlande , S. 349-351.
- Poliak, J.; Hänsel, F.; May, J.; Lux, M.; Becker, U.; Schnieder, E. (2006i): Reference Measurement Platforms for Satellite Based Safety Applications: Proceedings on the International Symposium on Operational Space Applications. Toulouse .
- Poliak, J.; Marais, J.; Hänsel, F. (2007b): Validation Process for Usage Galileo in Railways: Proceedings of the 15th international symposium "Towards more competitive European rail systems" - EURNEX-ZEL .
- Poliak, Jan; Marais, Juliette; Hänsel, Frank; Becker, Uwe; Schnieder, Eckehard (2008b): Methods and Tools for the Certification of GALILEO Localisation for Railway Applications: Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research (WCRR) 18.-22. Mai 2008, Seoul, Korea .
- Polke, Martin; Eppe, Ulrich; Ahrens, Wolfgang (1994): Prozeßleittechnik. 2., völlig überarb. und stark erw. Aufl. München: Oldenbourg.
- Prinz, T. (2006): GPS-Anwendungen in den Geowissenschaften. Script.

- Puente, E. A. (1959): Bemessungsregeln für kontinuierlich veränderbare Verzögerungsleitungen mit einer oberen Grenzfrequenz von 1 bis 50 MHz. Technische Universität Braunschweig.
- RailOrt (1998): Band 1: Schlussbericht. Ortung im spurgebundenen Verkehr auf der Basis von Satelliten-Navigation. Unter Mitarbeit von E. Schnieder, G. Bikker und Karl-Albrecht Klinge et al. Herausgegeben von IfRA und Institut für Flugführung TU Braunschweig. Braunschweig.
- Revnivykh, Sergey (Hg.) (2008): GLONASS Status and Progress. GNSS Summit 2008. Munich: GNSS Summit 2008.
- Rieckenberg, T. (2004): Telematik im Schienengüterverkehr: ein konzeptionell-technischer Beitrag zur Steigerung der Sicherheit und Effektivität. Technische Universität Braunschweig.
- Riedel, H.; Grünleitner, H.; Buxbaum, B., et al. (Hg.) (2005): Räumliches Wahrnehmen der Fahrerumgebung mit PMD-Sensorik in Assistenz- und Sicherheitssystemen.
- Robert, Philippe (2003): Galilei Report on System Certification (Final Report). Sustainable Mobility and Intermodality Promoting Competitive and Sustainable Growth. GALI-DNV-DD-100. Unter Mitarbeit von Per Oscar Saugestad, Narve Mjoes und Gérard Alcouffe. Herausgegeben von DNV, DLR, FDC, Thales, Alenia, VITROCISET und IsoScope.
- Rohling, H.; Lissel, E. (77): GHz Lidar Sensor for Car Applications “. In: The Record of the IEEE 2005 International Lidar Conference, Alexandria, VA, S. 373.
- Roßbach, Udo (2000): Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS. Online verfügbar unter <http://137.193.200.177/ediss/rossbach-udo/inhalt.pdf>  
<http://137.193.200.177/ediss/rossbach-udo/inhalt.pdf> <http://137.193.200.177/ediss/rossbach-udo/inhalt.pdf>
- Rothacher, Markus (2007): Satellitengeodäsie1: Springer Verlag.
- Rüffert, Jürgen; Hemmert, Julia (2005): Galileo meets Geodesy. Intergeo Forum 2005: ALLSAT.
- Ruiz, Luis (Hg.) (2003): Le système européen de positionnement par satellite GALILEO.
- SATNAB (2007): Voruntersuchung für ein satellitennavigationsgestütztes Bodenexperiment. Technischer Bericht. Unter Mitarbeit von Eckehard Schnieder und M.Schroeder, A.Shah, I. Illgen, H. Schüssler, M. Kaiser, H.L. Trautenberg. Herausgegeben von IfRA, DSS und DLR, 2007, S. 1–64.
- Schildt, Gerhard H. (2008): Satellitennavigation. GPS, GLONASS und GALILEO. Brunn/Gebirge: Lyk Informationstechnik.
- Schlingelhof, Marius (2005): Mehr Verkehrssicherheit durch Galileo. In: INTERNATIONALES VERKEHRSWESEN, Jg. 7+8, H. 57, S. 337-339.
- Schmidt, Michael; Winter, Joachim (2000): Anforderungen der GPS-basierten Ortung an den digitalen Streckenatlas. In: Signal + Draht, Jg. 4, H. 92, S. 12-17.
- Schnieder, E. (1999): Methoden der Automatisierung Beschreibungsmittel: Vieweg-Verlag.
- Schnieder, E. (Hg.) (2007): Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs. Unter Mitarbeit von E. Schnieder. Berlin/Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Schnieder, E.; Becker, U.; Hänsel, F.; May, J.; Poliak, J. (2006): Vehicle Autarkic Positioning as a Basis for a Low Cost Train Protection System on Secondary Lines. In: WCRR (Hg.): Abstracts of the 7th World Congress on Railway Research - WCRR. Montréal/Canada , S. 86.
- Schnieder, E.; Schnieder, L. (2008): Axiomatik der Begriffe für die Automatisierungstechnik. Entwurf komplexer Automatisierungssysteme - EKA 2008. Beschreibungsmittel, Methoden, Werkzeuge und Anwendungen ; 10. Fachtagung, 15. bis 16. April 2008 Tutorium, 16. bis 17. April 2008 Fachtagung, Magdeburg. Herausgegeben von Ulrich Jumar, Eckehard Schneider und Christian Diedrich. Magdeburg: Univ.
- Schnieder, Eckehard (2008): Nutzung von Satellitennavigation für Eisenbahnen aus normativer Sicht. Symposium "Rechtsfragen der Satellitennavigation". Herausgegeben von BavAIRia e.V.
- Schnieder, Eckehard (1993): Prozessinformatik–Einführung mit Petrinetzen. 2. erweiterte Auflage: Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Schnieder, L.; Schnieder, E. (2007): Formalisierung von Begriffs- und Modellkonzepten zur Beschreibung der Funktionsimplementierung in Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. In: Verkehrswiss. Tage, Dresden.
- Seeber, Günter; Schmitz, Martin (2007): Methodik der GPS- und DGPS-Messung.



- Shin, Kyung-Ho; Shin, Ducko; Joung, Eui-Jin, et al. (Hg.) (2008): A study on the reliability improvement for applying GNSS to railroad system: WCRR Seoul.
- Siemens (2005a): Pictures of the Future - The Magazine for Research and Innovation.
- Siemens (2006): Entspannter und sicherer zum Ziel – Lidar-Technologie. Online verfügbar unter [http://www.siemensvdo.de/products\\_solutions/chassis-carbody/safety-systems/components-for-advanced-driver-assistance-systems/lidar-technology/lidar-sensor.htm](http://www.siemensvdo.de/products_solutions/chassis-carbody/safety-systems/components-for-advanced-driver-assistance-systems/lidar-technology/lidar-sensor.htm).
- Siemens, Transportation Systems (2005b): EUROBALISE S21 für TRAINGUARD. Online verfügbar unter [http://www.transportation.siemens.com/de/data/pdf/ts\\_ra/ds\\_eurobalise\\_s21\\_de1.pdf](http://www.transportation.siemens.com/de/data/pdf/ts_ra/ds_eurobalise_s21_de1.pdf).
- Sommer, K.-D.; Siebert, B.R.L. (2004): Grundlagen und praktische Umsetzung der Messunsicherheitsbestimmung nach GUM. VDI-Berichte Nr. 1867. Herausgegeben von VDI. Ilmenau; Braunschweig.
- Spilker (1996): Signal Structure and Theoretical Performance. By the American Inst. Of Aeronautics; Astronautics, Inc (Hg.).
- Stadlmann, B. (2008): GPS based train control system in Austria. Herausgegeben von ZEL-GNSS 2008.
- Stefano, Ernesto (2002): Potenzial satellitengestützter Ortungssysteme für Anwendungen im Eisenbahnbetrieb. Technische Universität Braunschweig.
- Styles, John; Costa, Nina; Jenkins, Bryan (2004): ProDDAGE. GALILEO Market Analysis. Herausgegeben von EC.
- SUBSET (2002): SUBSET026-preface v222. SUBSET (Hg.).
- Svítek, Miroslav (2006): Dynamical Systems with Reduced Dimensionality. Herausgegeben von Faculty of Transportation Sciences, Czech Technical University in Prague.
- Telelogic (2001a): Managing DOORS. Telelogic (Hg.): Telelogic.
- Telelogic (2001b): Using DOORS. Telelogic (Hg.): Telelogic.
- Thaller, Georg Erwin (1999): Satelliten im Erdorbit. Nachrichten, Fernsehen und Telefonate aus dem Weltall ; mit 72 Tabellen. München: Franzis.
- Thomas, M.; Lowe, D.; Dumwille, M.; Roberts, W.; Cross, P.; Nunn, T.; Robert, G. (2008): Dependability of GNSS on the UK Railways: WCRR Seoul .
- Tiemeyer, Bernd (2001): Performance evaluation of satellite navigation and safety case development. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München.
- Tirtaine, T.; Marais, J. (2005): Validation expérimentale du logiciel de lancer de rayons Ergospace et estimation de la précision du MNE requise pour son utilisation. In: INRETS, H. 102, S. 50–54.
- Troppmann, R.; Hüger, A. (2000): Design Linie A. In: Signal + Draht.
- UIC (2005a): Galileo applications for rail. Roadmap for implementation. UIC (Hg.): UIC.
- UIC (2005b): Galileo applications for rail. Economic estimates of GNSS / Galileo applications. UIC (Hg.): UIC.
- UIC (2006): Galileo applications for rail. Integration of technologies for maximisation of effects. UIC (Hg.): UIC.
- UIC (2007): SAREGA Project. Assessment of safety requirements of GNSS / GALILEO supported train locators on low traffic density lines. Unter Mitarbeit von G. Barbu, E. Schnieder und J. Poliak. Herausgegeben von UIC.
- Urech, A.; Diestro, J. P.; González, O. (2002): GADEROS, a Galileo Demonstrator for Railway Operation System. In: Proceedings of DASIA 2002, 13-16 May 2002, Dublin, Ireland. Ed.: RA Harris. ESA SP-509, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-819-0, 2002, p. 46.1-46.6, published on CD-ROM, Session 7B.
- Van den Berg, A.; Dieleman, P. (2002): A practical interpretation of performance requirements for a Global Navigation Satellite System. National Aerospace Laboratory (Hg.).
- Van Nee, R.D.J.; Sierveld, J.; Fenton, F. C.; Townsend, B. R. (1994): The Multipath Estimating Delay Lock Loop: Approaching Theoretical Accuracy Limits: Proceedings IEEE 1994 Position Location and Navigation Symposium .

- VKU (2004): Vysoke Tatry. Turisticka mapa. Herausgegeben von VKU. Harmanec.
- Wald, L. (1998): A European proposal for terms of reference in data fusion. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Jg. 32, H. Part 7, S. 651–654.
- Walter, Heinrich (1998): Signaltechnische Sicherung von Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Linienzugbeeinflussung.
- Weilkiens, Tim (2006): System Engineering mit SysML/UML. Tim Weilkiens (Hg.): dpunkt.verlag.
- Wildt, Steffen (2006): Mehrwegeausbreitung bei GNSS-gestützter Positionsbestimmung.
- Wolf, R.; Thalhammer, M.; Hein, G. W. (2003): GATE-The German Galileo Test Environment. In: ION GPS/GNSS, Jg. 2003, S. 1009–1015.
- Xu, Z.; Schwarte, R.; Heinol, H.; Buxbaum, B.; Ringbeck, T. (1998): photonic mixer device (PMD) – New system concept of a 3D-imaging camera-on-a-chip: Proceedings of the M2VIP '98 - International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice , S. S. 259 - 264.
- Yarlagadda, R.; Ali, I; Al-Dharir; Hersgey, J (1997): Geometric Dilution of Precision (GDOP): Bounds and properties, General Electric Company.
- Young, L. E.; Neilan, R. E.; Blitzacker, F. R. (1985): GPS Satellite Multipath. An Experimental Investigation: Proceedings of the Symp. on Pos. GPS , S. 423-432.
- Zahradnik, Jiri (2008): ZEL GNSS 2008. GNSS based train position detection.
- Zahradnik, Jiri; Rastocny, Karol (2006): Aplikacie zabezpečovacich systemov.
- Zhou, Yong (2006): Realisierung eines Referenzsystems für eine Ortungsplattform. Herausgegeben von TU-Braunschweig IVA.
- Zogg, Jean-Marie (2006a): Grundlagen der Satellitennavigation.
- Zogg, Jean-Marie (2006b): Von GPS zu Galileo - Die Weiterentwicklung der Satelliten-Navigation, Jg. 4.